

Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient Algoritmasının Kısa Dönem
Hidrotermal Koordinasyon Problemine Uygulanması

Burak Urazel

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2017

Application of Modified Subgradient Algorithm Based on Feasible Values to Short
Term Hydrothermal Coordination Problem

Burak Urazel

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Electrical and Electronics Engineering

May 2017

Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient Algoritmasının Kısa Dönem
Hidrotermal Koordinasyon Problemine Uygulanması

Burak Urazel

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Telekomünikasyon-Sinyal İşleme Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Salih Fadıl

Mayıs 2017

ONAY

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Burak Urazel'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient Algoritmasının Kısa Dönem Hidrotermal Koordinasyon Problemine Uygulanması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Salih Fadıl

İkinci Danışman : -----

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Salih Fadıl

Üye : Doç. Dr. Bünyamin Tamyürek

Üye : Doç. Dr. Celal Yaşar

Üye : Doç. Dr. Yılmaz Aslan

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ümmühan Başaran Filik

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

Prof. Dr. Hürriyet ERŐAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Salih Fadıl danışmanlığında hazırlamış olduğum “Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient Algoritmasının Kısa Dönem Hidrotermal Koordinasyon Problemine Uygulanması” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 26/05/2017

Burak Urazel

İmza

ÖZET

Bu çalışmada uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient (F-MSG) algoritması kullanarak kısa dönem hidrotermal koordinasyon problemi (KDHKP) çözülmüştür. KDHKP, bir güç sisteminde enerji talebin en düşük yakıt maliyeti ile karşılayabilmek için bütün termik ve hidrolik birimlere ait optimal güç üretimlerinin bulunduğu doğrusal olmayan bir kısıtlı optimizasyon problemidir. Problemin çözümü için iki farklı iteratif yöntem geliştirilmiştir. Önerilen ilk çözüm yönteminde, herbir alt zaman dilimindeki güç dağıtım problemi F-MSG algoritması kullanılarak çözülürken, hidrolik birime ait gölge su fiyatı yardımıyla da ele alınan işletim süresi boyunca hidrolik birimin harcadığı net su miktarı ayarlanmıştır. Önerilen ikinci yöntem ise, herbir iterasyonu iki adımdan oluşan iteratif bir yöntemdir. İlk adımda bir önceki iterasyonda elde edilen aktif güç kaybı kullanılarak üretim birimlerinin sadece aktif güç üretimleri belirlenmektedir. İkinci adımda, hidrolik birimlere ait aktif güç üretimleri bir önceki adımda elde edilen değerlerinde sabit tutulmakta, sisteme ait tam optimizasyon modeli kullanılarak, tüm alt zaman dilimlerindeki termik birimlere ait aktif ve reaktif güç üretimleri hesaplanmaktadır. Önerilen çözüm yöntemleri üç farklı KDHKP’i üzerinde denenmiştir ve optimal yakıt maliyeti ve çözüm zamanı açısından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kısa dönem hidrotermal koordinasyon problemi, F-MSG algoritması, Değişken düşü, Sözde su fiyatı.

SUMMARY

In this thesis the short term hydrothermal coordination problem (STHCP) is solved by using the modified subgradient algorithm based on feasible values (F-MSG). STHCP is a nonlinear constrained optimization problem where the optimal power generations of all thermal and hydraulic units are determined in order to supply the energy demand of a power system with the lowest fuel cost. Two different iterative solutions are developed and applied to solve the problem. In the first solution method, the F-MSG algorithm is used to solve the dispatch problem in each subinterval while the pseudo water price for the hydraulic unit is employed to regulate the amount of water spent by it during the considered operation period. The second solution method is an iterative one whose single iteration is made up of two steps. In the first step, only the active generations of all units in the operation period are determined by using the actual active loss determined in the previous iteration. In the second step, hydro generations found in the first step are kept constant and the exact model of the power system is used in each subinterval. All reactive generations and active generations of thermal units in the corresponding subintervals are determined one by one. The F-MSG method is employed to solve the optimization problems of both steps. The proposed solution algorithms are tested on three different STHCPs and better results are obtained in terms of optimal fuel cost values and solution time values.

Keywords: Short term hydrothermal coordination problem, F-MSG algorithm, Variable head, Pseudo water price.

TEŞEKKÜR

Yoğun alıőma programına rağmen hibir zaman yardımlarını esirgemeyen sayın danıőmanım Prof. Dr. Salih FADIL'a teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
3. KISA DÖNEM HİDROTERMAL KOORDİNASYON PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ	8
3.1. Termik Birimlerin Yakıt Maliyetleri	8
3.2. Sistemdeki Güç Üretim Tüketim Dengesi	9
3.3. Birimlerin Güç Üretim Sınırları	10
3.4. Güvenlik Kısıtları	12
3.5. Hidrolik Birimlere Ait Kısıtlar	13
3.6. Su Devamlılık Denklemi	15
3.7. Rezervuar Sınırları	16
3.8. Güç Akış Denklemleri	17
4. YÖNTEM	19
4.1. Genişletilmiş Lagrange Fonksiyonu İkiliği	19
4.2. F-MSG Algoritması	21
4.2.1. F-MSG algoritması adımları	22
4.2.2. Eşitsizlik kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi	25
<u>4.2.2.1. Gevşek değişkenler (slack variables) kullanılarak eşitsizlik</u> <u>kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi</u>	25
<u>4.2.2.2. “enb” fonksiyonu kullanılarak eşitsizlik kısıtlarının eşitlik</u> <u>kısıtlarına dönüştürülmesi</u>	26
4.3. F-MSG Algoritmasının KDHKP’ne Uygulanması	26

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.3.1. Sözde su fiyatı kullanarak KDHKP'nin çözümü	27
4.3.2. Yaklaşık model ve tam modelin beraber kullanıldığı iteratif yöntem.....	30
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
5.1. Sözde Su Fiyatı Kullanarak KDHKP'nin Çözümü.....	35
5.2. Sözde Su Fiyatı Yöntemi Kullanılarak Birden Fazla Hidrolik Birim İçeren Bir Güç Sisteminde KDHKP'nin Çözümü	45
5.3. Yaklaşık Model Ve Tam Model Birarada Kullanılarak KDHKP'nin Çözümü	48
5.4. Yaklaşık Model Ve Tam Model Birarada Kullanılarak Değişken Su Seviyeli Hidrolik Birimler İçeren Bir Test Sisteminde KDHKP'nin Çözümü	57
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR DİZİNİ	69
EK AÇIKLAMALAR	74
Ek Açıklama –A: 12 baralı test sistemine ait veriler.	75
Ek Açıklama –B: 16 baralı test sistemine ait veriler.	79
ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Hidrolik birimlerin birbirleri ile bağlantıları.....	49
A.1. 12 baralı test sistemi için tek hat diagramı.....	75
B.1. 16 baralı test sistemi için tek hat diagramı.....	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. $w=0,5$ için 3. alt zaman diliminde OPF çözümü sırasında üretilen uygun ve uygun olmayan değerler	40
5.2. $w=1,0$ ve $\eta = 0,75$ için sözde su fiyatı değerindeki değişime karşılık pompayla doldurmalı hidrolik birimin harcadığı net su miktarındaki değişim (<i>acre-ft</i> olarak)	41
5.3. $w=1,0$ ve $\eta = 0,75$ için KDHTKP'nin optimal çözüm noktasında birimlerin <i>pu</i> aktif ve reakti güç üretimleri	42
5.4. $w=1,0$ ve $\eta = 0,75$ için KDHTKP'nin optimal çözüm noktasında <i>pu</i> bara gerilim genlikleri	42
5.5. $w=1,0$ ve $\eta = 0,75$ için KDHTKP'nin optimal çözüm noktasında bara faz açıları (<i>rad</i> olarak)	43
5.6. $w=1,0$ ve $\eta = 0,75$ için KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki iletim hatlarında taşınan <i>pu</i> aktif güç değerleri	43
5.7. KDHTKP'ne ait tüm pareto optimal sonuçlar için toplam yakıt maliyeti, toplam emisyon maliyeti ve optimal sözde su fiyatı değerleri	44
5.8. Herbir iterasyonda sözde su fiyatı değerindeki değişime karşılık elde edilen $q_{harcanan,i}$ (<i>acre-ft</i>) ve $hata_i$ (<i>acre-ft</i>) değerleri	47
5.9. $iter=0$ için 1. Adımda elde edilen <i>pu</i> aktif güç üretimleri	50
5.10. $iter=0$ için 1. Adım sonunda hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları (<i>acre-ft</i> olarak)	50
5.11. $iter=1$ için 2. Adımda elde edilen <i>pu</i> aktif güç üretimleri	51
5.12. $iter=1$ için 2. Adım sonunda hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları (<i>acre-ft</i> olarak)	51
5.13. $iter=1$ için 3. Adımda elde edilen <i>pu</i> aktif güç üretimleri	52
5.14. $iter=1$ için 3. Adım sonunda hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları (<i>acre-ft</i> olarak)	52
5.15. Herbir iterasyon sonunda elde edilen yakıt maliyetleri	52
5.16. KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki <i>pu</i> aktif ve reaktif güç üretimleri	53

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.17. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasındaki pu bara gerilim genlikleri	54
5.18. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasındaki bara faz açıları (rad olarak)	54
5.19. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında iletim hatlarındaki pu aktif güç akış değerleri	55
5.20. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları ($acre-ft$ olarak)	56
5.21. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında hidrolik birimlerin alt zaman dilimi sonu rezervuar su miktarı ($acre-ft$ olarak)	56
5.22. KDHTKP'ye ait optimal yakıt maliyeti değerlerinin karşılaştırılması	56
5.23. $iter=0$ için 1. Adımda elde edilen pu aktif güç üretimleri	58
5.24. $iter=0$ için 1. Adım sonunda hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları ($acre-ft$ olarak)	58
5.25. $iter=1$ için 2. Adımda elde edilen pu aktif güç üretimleri	59
5.26. $iter=1$ için 2. Adım sonunda hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları ($acre-ft$ olarak)	59
5.27. $iter=1$ için 3. Adımda elde edilen pu aktif güç üretimleri	60
5.28. $iter=1$ için 3. Adım sonunda hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları ($acre-ft$ olarak)	60
5.29. Herbir iterasyon sonunda elde edilen yakıt maliyetleri	61
5.30. KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki pu aktif ve reaktif güç üretimleri	61
5.31. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasındaki pu bara gerilim genlikleri	62
5.32. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasındaki bara faz açıları (rad olarak)	62
5.33. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında iletim hatlarındaki pu aktif güç akış değerleri	63
5.34. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları ($acre-ft$ olarak)	64
5.35. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında alt zaman dilimi sonu rezervuar su miktarları ($acre-ft$ olarak)	64
A.1. 12 baralı test sistemi için hat parametreleri (pu olarak) .	76

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
A.2. 12 baralı test sisteminin <i>pu</i> yük dağılım çizelgesi	77
A.3. 12 baralı test sisteminde termik birimlerin <i>konveks</i> saat başı yakıt maliyeti fonksiyon sabitleri ve üretim sınırları	77
A.4. 12 baralı test sisteminde termik birimlerin saat başı emisyon fonksiyon sabitleri	78
A.5. 12 baralı test sisteminde iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri	78
B.1. 16 baralı test sistemi için hat parametreleri (<i>pu</i> olarak)	80
B.2. 16 baralı test sisteminin <i>pu</i> yük dağılım çizelgesi	81
B.3. 16 baralı test sisteminde termik birimlerin <i>konveks</i> saat başı yakıt maliyeti fonksiyon sabitleri ve üretim sınırları	81
B.4. 16 baralı test sisteminde <i>sabit su seviyeli</i> hidrolik birimlerin saat başı su salım fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları	82
B.5. 16 baralı test sisteminde <i>sabit su seviyeli</i> hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait parametreler	82
B.6. 16 baralı test sisteminde iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri	83
B.7. 16 baralı test sisteminde termik birimlerin <i>konveks olmayan</i> saat başı yakıt maliyeti fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları.	83
B.8. 16 baralı test sisteminde <i>değişken su seviyeli</i> hidrolik birimlerin saat başı su salım fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları	84
B.9. 16 baralı test sisteminde <i>değişken su seviyeli</i> hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait parametreler	84
B.10. 16 baralı test sisteminde iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri (<i>değişken su seviyeli</i> hidrolik birimler ele alındığı durumda).	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Kısaltmalar**

MSG

KDHKP

KSP

OPF

PSO

F-MSG

Açıklama

Geliştirilmiş subgradient

Kısa dönem hidrotermal koordinasyon problemi

Kısıt sağlama problemi

Optimal güç akış problemi

Parçacık sürü optimizasyonu

Uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Gelişen teknoloji ile beraber hayatın her alanında ortaya çıkan enerji ihtiyacının en üst seviyeye ulaştığı günümüzde, birincil enerji kaynağı olarak temelde fosil yakıtların kullanılması beraberinde yüksek maliyet, çevre kirliliği, dışa bağımlılık vb. sorunları doğurmuştur. Bununla beraber dünya üzerindeki fosil yakıt rezervlerinin günden güne hızla azalması sonucunda artan enerji talebinin karşılanabilmesi için yeni enerji kaynaklarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar da hız kazanmıştır. Sonuç olarak enerji üretiminin ve dağıtımının ucuz, kesintisiz ve sürdürülebilir olarak gerçekleştirilebilmesi günümüzün en önemli problemlerinden biri haline gelmiştir.

Bu çalışmada, termik ve hidrolik üretim birimleri içeren bir güç sisteminde enerji talebinin en düşük yakıt maliyeti ile karşılanabilmesi için termik ve hidrolik birimlere ait optimal güç üretimlerinin bulunduğu hidrotermal koordinasyon problemine çözüm aranmıştır. Öncelikle ele alınan problemle ilgili literatürdeki çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra ele alınan probleme ait detaylı bir matematiksel model oluşturulmuştur. Ardından problemin çözümünde kullanılacak yöntemler önerilmiş ve bu yöntemler çeşitli problemler üzerinde test edilmiştir. Son olarak elde edilen sonuçlar ortaya konmuş ve bu sonuçlar için yorum ve önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kısa dönem hidrotermal koordinasyon problemi (KDHKP)'nin amacı, belli bir işletim süresi boyunca (1 günden 1 haftaya kadar) yük talebini karşılayabilmek için, hidrolik ve termik birimlerin optimal olarak işletilmesidir (Wood ve Wollenberg, 1996). Bunun için birçok elektriksel ve fiziksel kısıtlar altında termik birimlerin yakıt maliyetleri enküçüklenmektedir. Sağlanması gereken güç üretim-tüketim dengesi, güvenlik kısıtları, birimlerin güç üretim sınırları, hidrolik birimlerin rezervuar hacim kapasiteleri gibi kısıtlara ek olarak, sistemdeki hidrolik birimlerin hem elektriksel, hem de hidrolik olarak birbirlerine bağlı olmaları, KDHKP'yi büyük boyutlu, doğrusal olmayan karmaşık bir optimizasyon problemi haline dönüştürmektedir.

KDHKP'nin çözümü için literatürde birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemleri deterministik yöntemler ve sezgisel yöntemler olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür. Türev tabanlı optimizasyon metotları olarak da adlandırılabilir klasik deterministik yöntemler, optimal çözüme ulaşmak için gradyent, hesyan vb. operatörleri kullanarak tek bir yol üzerinde arama yapmaktadırlar. Sezgisel yöntemler ise popülasyon tabanlı arama yöntemlerini kullanarak çözüm uzayının tamamı üzerinde arama yapmaktadırlar. Bu farklılıktan dolayı konveks olmayan problemlerin çözümünde sezgisel yöntemler daha iyi çözümler üretebilmektedir. Ayrıca sezgisel yöntemlerde seçilen başlangıç noktasının çözüm üzerine etkisi deterministik yöntemlere göre daha azdır. Bir çözüm noktasından diğerine geçişte deterministik yöntemler, deterministik geçiş kurallarını kullanırken sezgisel yöntemlerde bu geçiş rassal tabanlı olmaktadır. Bu da sezgisel yöntemlerde global enküçük değer yerine yerel enküçük değerlere ulaşma olasılığını azaltmaktadır. Sezgisel yöntemler, sahip oldukları bu avantajlara rağmen her zaman en iyi sonuca ulaşma garantisi vermemektedir (Wood ve Wollenberg, 1996).

Büyük boyutlu optimizasyon problemlerinin çözümünde, problemin birbirinden bağımsız daha küçük alt problemlere ayrılmasında kullanılan yöntemlerin en yaygını Lagrange gevşetmesi'dir. Bu yöntemde oluşturulan alt problemler için Lagrange çarpanlarının optimal değerleri hesaplanarak ikil problem için en iyi çözüm bulunmaktadır. Yan vd. (1993), KDHKP'ni hidro alt problem ve termal alt problem olarak iki alt probleme

ayırımıdır. Hidro alt problem değer sırasına göre atama (*merit order allocation*) yöntemi, termal alt problem ise dinamik programlama ile çözülmüştür. Hidro alt problem lineer olarak modellenmiş, hidrolik birimlerin çalışmaya başlama maliyetleri ve sistem kayıpları göz önüne alınmamıştır. Guan vd. (1997) hidrolik birimler birbirlerine hidrolik olarak bağlı modellenmiştir. Hidrolik birimlerin çalışmaya başlama maliyetleri modele eklenirken sistem kayıpları ise göz önüne alınmamıştır. Ahmed vd. (2002) Lagrange çarpanları gevşetilmesi için Dantzig–Wolfe doğrusal programlaması ve dal sınır (*branch and bound*) ayırma yöntemini kullanmıştır. Ayrıca sistem kayıpları da modele eklenmiştir. Sifuentes ve Vargas'a (2007) göre KDHKP, Benders ayrışımı yöntemi ile alt problemlere ayrılmıştır. Sistem kayıpları hem DC güç akışı, hem de AC güç akışı kullanılarak hesaplanmıştır. Amjady ve Ansari (2013) KDHKP'ni Benders ayrışımı yöntemi ile alt problemlere bölmüştür. Ana probleme ait birim yükleme (*unit commitment*) problemi tamsayı programlama yöntemiyle çözüldürken, her bir alt zaman dilimindeki ekonomik güç dağıtım problemi ise doğrusal olmayan programlama ile çözülmüştür. Hidrolik birimlerin güç üretimleri sadece su salınımlarının fonksiyonu olarak tanımlanmış, rezervuar hacminin veya düşünün etkisi göz önüne alınmamıştır. Termik birimlerin yakıt maliyetleri ikinci dereceden polinomlar olarak modellenmiş, sistem kaybı ise AC güç akışı kullanılarak hesaplanmıştır. Parastegari vd. (2013) Benders ayrışımı ile oluşturulan alt problemlerin çözümünde sezgisel yöntemleri kullanmıştır. Termik birimlerin yakıt maliyetleri modellenirken valf nokta etkisi ile yasaklı işletim bölgeleri modele dahil edilmiştir. Hidrolik birimlerin güç üretimleri ise sadece su salınımlarının bir fonksiyonu olarak tanımlanmış, rezervuar hacminin etkisi ihmal edilmiştir. Sistem kaybı ise AC güç akışı kullanılarak hesaplanmıştır.

Karışık tamsayı programlama yöntemlerinde problemdeki bütün sürekli ve kesikli değişkenler, tamsayı değerleri almaktadırlar. Nilsson ve Sjelvgren (1996) hidro elektrik sistemler için tamsayı programlama modeli oluşturmuştur. Önerilen yöntem, nükleer ve hidro birimler içeren bir güç sisteminde denenmiştir. Modeli basitleştirmek için sistem kayıpları modele dahil edilmemiştir. Wang vd. (2004) hidrolik birimlerin su salınım eğrilerini doğrusal olarak modellemiş ve rezervuar hacminin su salınıma etkisini ihmal etmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında sistem kayıpları modele dahil edilmemiştir.

KDHKP'nin çözümünde kullanılan bir diğer yöntem ise dinamik programlamadır. Bu yöntemde, böl ve yönet metotlarına benzer olarak, öncelikle alt problemlerin çözülmesi ve elde edilen bu çözümlerin birleştirilerek asıl probleme ait bir çözüme ulaşılması hedeflenmektedir. Li vd.ne (1997) göre öncelik sıralamasına dayalı dinamik programlama (*priority-list-based dynamic programming*) kullanılarak problemin boyutu azaltılmaya çalışılmıştır. Amaç fonksiyonu termik birimlerin toplam yakıt maliyeti ile hidrolik birimlerin çalışmaya başlama maliyetlerinin toplamı olarak belirlenmiştir. Sistem kayıpları modele dahil edilmemiştir. Yu (2006) ise çok geçişli dinamik programlama (*multi-pass dynamic programming*) ile evrimsel programlama yöntemini bir arada kullanarak KDHKP'ni çözmeye çalışmıştır. Önerilen yöntem, termik, hidrolik ve pompayla doldurulmalı birimler içeren bir güç sisteminde denenmiştir.

Genetik algoritma popülasyon tabanlı sezgisel bir çözüm yöntemidir. Popülasyondaki bireyler üzerine genetik operasyonlar uygulayıp, daha iyi bireyler elde edilmekte ve neticede en iyi çözüme ulaşma hedeflenmektedir. (Wood ve Wollenberg, 1996). Genetik algoritma optimizasyon modelindeki amaç fonksiyonu ve kısıtlara bakılmaksızın hemen hemen her probleme uygulanabildiğinden sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak en iyi çözüme ulaşabilmek için yüksek çözüm zamanları gerekebilmektedir. Chen ve Chang'a (1996) göre hidrolik olarak birbirine bağlantılı (*hydraulically coupled*) hidrolik birimler içeren sistemde KDHKP'nin genetik algoritma kullanılarak çözümü gerçekleştirilmiştir. Rezervuardaki su hacminin su salınımı üzerine etkisi ve su taşıma gecikmeleri modele dahil edilmiştir. Wu vd. (2000) genetik algoritma yapısında diploid genotipler kullanmış ve diploid genotip ile haploid genotip yaklaşımları arasındaki farkları ortaya koymuşlardır. Gil vd. (2003) ise KDHKP'ni günlük veya haftalık birim yükleme problemi ile saatlik ekonomik dağıtım alt problemlerine ayırmış ve bu iki alt problemi aynı anda çözmüştür. Kumar ve Naresh'e (2007) göre ise gerçek kodlu (*real coded*) genetik algoritma ve ikilik kodlu (*binary coded*) genetik algoritma KDHKP'ye uygulanmış ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Termik birimlerin yakıt maliyetleri modellenirken valf nokta etkisi göz önüne alınmıştır. Sasikala ve. Ramaswamy (2010) KDHKP'ni genetik algoritma ile çözerken değişken sayısını, alt zaman dilimi sayısından bağımsız olarak azaltabilmek için optimal gamma değeri yaklaşımını (*optimal gamma value approach*) kullanmıştır. Ancak rezervuar hacminin su salımına etkisi ihmal edilmiş ve valf nokta etkisi modele dahil edilmemiştir. Senthil vd. (2011) KDHKP'nin çözümünde

genetik algoritma kullanırken hidrolik birimlerin güç üretimini, su salınımı ve rezervuar hacminin bir fonksiyonu olarak modellemiştir. Ayrıca modele güvenlik kısıtları da dahil edilmiştir. Bisht (2012) ise, KDHKTP'nin çözümünde öncelikle hidro birimlerin optimal güç üretim değerlerini hesaplamış, sonrasında termik birimler için optimal güç dağıtım problemini çözmüştür. Termik birimler için valf nokta etkisi modele dahil edilmemiş, hidrolik birimlerin güç üretimi su salınımı ve rezervuar hacminin bir fonksiyonu olarak alınmıştır. Ancak sistemdeki kayıplar göz önüne alınmamıştır.

Populasyon tabanlı stokastik bir optimizasyon tekniği olan diferansiyel evrim algoritması, konveks olmayan problemlere de uygulanabildiği için birçok optimizasyon probleminin çözümünde kullanılmaktadır. Mandal ve Chakraborty'e (2008) göre hidrolik olarak birbirine bağlı hidrolik birimler içeren güç sisteminde, KDHKP'yi diferansiyel evrim algoritması ile çözülmüştür. Sistemdeki termik birimler için valf nokta etkisi modele dahil edilmiştir. Hidrolik birimlerin güç üretimi su salınımı ve rezervuar hacminin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Su taşıma gecikmesi de modele dahil edilirken sistem kayıpları ihmal edilmiştir. Lu vd. (2010) diferansiyel evrim algoritmasını KDHKP'ne uygularken sistem kayıplarını B-matrisini kullanarak hesaplamıştır. Wanga vd. (2012) ise önceki çalışmalarındaki termik ve hidrolik kısıtlara ek olarak güvenlik kısıtlarını da modele dahil etmiştir. Basu (2014) diferansiyel evrim algoritmasının daha verimli arama yapabilmesi için ölçeklendirme faktörü yerine Gauss dağılımına sahip rassal değişken kullanmıştır. Termik birimlerin yasaklı işletim bölgeleri ile hidrolik birimlerin yasaklı su salım bölgeleri de modele dahil edilmiştir.

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışlarını örnek alarak geliştirilmiş bir evrimsel çözüm yöntemidir. Sezgisel yöntemlerin sahip olduğu avantajların yanında, diğer yöntemlere göre belirlenmesi gereken parametre sayısı azdır. Mandal vd. (2008) birbirine hidrolik olarak bağlı hidro birimler içeren bir güç sisteminde KDHKP'ni PSO yöntemi kullanarak çözmüştür. Sistemdeki termik birimler için valf nokta etkisi modele dahil edilmiştir. Hidrolik birimlerin güç üretimi su salınımı ve rezervuar hacminin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Su taşıma gecikmesi modele dahil edilirken sistemdeki kayıplar göz önünde bulundurulmamıştır. Yuan vd. (2008) parçaların uğradığı en kötü çözüm noktasının da hatırlanmasını sağlayarak daha etkin bir arama gerçekleştirmeye çalışmıştır. Ancak termik birimlerin yakıt maliyetleri ikinci derece

polinom olarak modellenmiş ve sistemdeki kayıplar ihmal edilmiştir. Hota vd. (2009) termal ve hidro kısıtlara ek olarak yasaklı işletim bölgeleri ile yasaklı su salım bölgelerini de modele eklemiştir. Amjady ve Soleymanpour (2010) modele birim aktif güç üretim değişimi sınır kısıtlarını da eklemiş, sistem kayıplarını ise B-matris katsayıları kullanılarak hesaplamıştır. Wang vd.ne (2012) göre PSO'nun evrim aşamasında bilişsel oranı (*cognitive rate*) ve sosyal öğrenme oranı (*social learning rate*) değerleri değiştirilerek her parçacığın evrim yönü düzenlenmiş, böylece PSO'nun çözüme yakınsama hızı arttırılmıştır. Ancak valf nokta etkisi ve sistem kayıpları modele dahil edilmemiştir. Hinojosa ve Leyton (2012) hidro birimlerin su salımı değerlerini sürekli değişkenler olarak alırken, termik birimlerin çalışma durumlarını ikilik değişken olarak modellemiştir. Bu çalışmada da valf nokta etkisi ve sistem kayıpları modele dahil edilmemiştir.

KDHKP çözümünde, bu yöntemlere ek olarak, Hopfield sinir ağları (Basu, 2003), kültürel algoritma (*cultural algorithm*) (Yuan ve Yuan, 2006), klonal seçim algoritması (*clonal selection*) (Swain vd., 2011), yapay bağışıklık sistemi algoritması (Basu, 2011), yapay arı kolonisi algoritması (Liao vd., 2015) kullanılmıştır. Farhat ve El-Hawary (2009) literatürde KDHKP'ne yönelik çalışmaları incelenmiş ve bu çalışmalar hakkında kısaca bilgiler vermiştir.

Kasimbeyli vd. (2009) tarafından geliştirilmiş uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradyent (F-MSG) yöntemi asıl-ikil eniyi amaç fonksiyonu değerini uygun (*feasible*) ve uygun olmayan (*infeasible*) amaç fonksiyonu değerleri yardımıyla bulmaya çalışan bir yöntemdir. Problemin uygun ve uygun olmayan değerleri elde edilirken genişletilmiş (*augmented*) Lagrange fonksiyonu kullanıldığı için amaç fonksiyonunun veya herhangi bir kısıtın dışbükey olmaması durumunda, optimal çözüm noktasında asıl problemin en küçük değeri ile ikil problemin en büyük değeri arasında sıfır ikil aralık sağlanmaktadır (Gasimov, 2002).

F-MSG algoritması, genişletilmiş Lagrange ikil fonksiyon için keyfi bir üst sınır seçilmesiyle çalışmaya başlar. Algoritma, seçilen üst sınırın altında uygun çözüm olup olmadığını kontrol eder. Eğer çözüm varsa buna karşı amaç fonksiyonu değeri, yeni üst sınır olarak alınır ve süreç yeniden başlar. Bu süreç, verilen üst sınıra uygun çözüm vermeyen bir sınıra gelinceye kadar devam eder. Uygun çözüm vermeyen sınır, alt sınır

olarak alınır ve problemin eniyi çözümü için bir alt ve üst sınır elde edilmiş olur. Daha sonra alt ve üst sınırlar arasındaki aralık, belli bir toleranstan küçük olana kadar daraltılır (Üstün, 2007, Kasimbeyli vd., 2009).

Literatürde bu yöntem çeşitli güç sistemi optimizasyon problemlerine uygulanmıştır. Fadıl vd. (2012) F-MSG yöntemi ile termik birimlerden oluşan güç sistemindeki ekonomik dağıtım problemini çözmüştür. Termik birimler için konveks olmayan yakıt maliyet fonksiyonları kullanılmıştır. Sistem kayıpları ise AC güç akış denklemleri yardımı ile modele dahil edilmiştir. Fadıl vd. (2011) F-MSG yöntemini ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren güç sistemlerindeki optimal güç dağıtım problemine uygulamıştır. Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin yakıtlarının ya-al-yada-öde (*take-or-pay*) anlaşmasıyla temin edildiği varsayılmıştır. Fadıl ve Urazel (2013) pompayla doldurmalı hidrolik birim içeren enerji sistemlerinde optimal güç dağıtım problemini F-MSG yöntemi ile çözmüşlerdir. Pompayla doldurmalı birimin sağladığı kazanç, üç farklı çevrim verimi değeri için hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Fadıl ve Urazel (2014) termik birimlerin atık gaz emisyonlarını da modele dahil etmiş ve güç dağıtım problemini çok amaçlı bir optimizasyon problemi haline getirmişlerdir. Bu çok amaçlı optimizasyon problemi ağırlıklı toplam yöntemi kullanılarak tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Daha sonra problemin farklı ağırlık değerleri için, F-MSG algoritması kullanarak, pareto-optimal çözümleri elde edilmiştir. Ayrıca bazı termik birimler, yakıtı ya al-yada- öde anlaşmasıyla temin edilen, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler olarak modellenmiştir. Fadıl ve Urazel (2014) pompayla doldurmalı birim içeren güç sistemi için çevresel-ekonomik güç dağıtım problemini ele almışlardır. Sisteme ait pareto optimal çözümler, üç farklı çevrim verimi değeri için, F-MSG algoritması yardımıyla bulunmuştur.

Bu çalışmada F-MSG algoritması kullanılarak KDHKP'nin çözümü için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Öncelikle KDHKP'nin matematiksel modeli oluşturulmuş, amaç fonksiyonu ve kısıtlar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Sonrasında genişletilmiş Lagrange fonksiyonu ikiliği incelenmiş ve F-MSG algoritmasının adımları verilmiştir. Ardından F-MSG algoritması kullanılarak KDHKP'nin çözümü için geliştirilen yöntemler çeşitli örnek problemlere uygulanmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Son olarak yorum ve önerilerde bulunulmuştur.

3. KISA DÖNEM HİDROTERMAL KOORDİNASYON PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİ

KDHKP temelde doğrusal olmayan kısıtlı bir optimizasyon problemidir. Problemin amacı, belirli bir işletim süresi boyunca çeşitli elektriksel ve hidrolik kısıtlar altında, termik birimlerin toplam yakıt maliyetlerinin enküçüklenmesi olarak tanımlanabilir.

3.1. Termik Birimlerin Yakıt Maliyetleri

KDHKP'de enerji sistemindeki termik birimlerin toplam yakıt maliyeti enküçüklenmeye çalışılmaktadır. Toplam yakıt maliyeti Denklem (3.1)'deki eşitlikle ifade edilebilir (Fadıl vd., 2012).

$$F_T = \sum_{j=1}^{j_{enb}} \sum_{i \in N_T} F_{i,j} t_j, \quad i \in N_T \quad (3.1)$$

Burada, $F_{i,j}$; i barasına bağlı termik biriminin j . alt zaman dilimindeki saat başına yakıt maliyet değerini (R/saat), N_T ; termik birimlerin bağlı olduğu baraları içeren kümeyi, t_j ; j . alt zaman dilimi süresini (saat), j_{enb} ; işletim süresinin sahip olduğu toplam alt zaman dilimi sayısını göstermektedir. Bir termik birimin saat başına yakıt maliyeti ise, Denklem (3.2)'de gösterildiği gibi aktif güç üretiminin bir fonksiyonu olarak yazılabilir (Fadıl vd., 2012).

$$F_{i,j} = F_{i,j}(P_{Gi,j}) = b_i + c_i P_{Gi,j} + d_i P_{Gi,j}^2 \quad (R/h) \quad (3.2)$$

Burada, $P_{Gi,j}$; i barasına bağlı üretim biriminin j . alt zaman dilimi boyunca aktif güç üretim değerini (MW ya da pu), b_i , c_i , d_i , ise fonksiyon sabitlerini göstermektedir. Ancak büyük kapasiteli üretim birimlerindeki türbinler çoklu buhar giriş vanalarına sahiptirler. Aktif güç üretimini arttırmak için bu valfler açıldığında, ilk anda kısılma kayıpları (*throttling losses*) aniden artar ve termik birimin artımsal ısı oranı (*incremental*

heat rate) aniden yükselir. Yakıt maliyet eğrisinin konveks olmayan bir fonksiyona dönüşmesine neden olan bu duruma valf nokta etkisi (*valve point effect*) adı verilmektedir. Valf nokta etkisi probleme dahil edildiğinde üretim biriminin saat başı yakıt maliyeti Denklem (3.3) ile gösterilebilir (Fadıl vd., 2012).

$$F_{i,j} = F_{i,j}(P_{Gi,j}) = b_i + c_i P_{Gi,j} + d_i P_{Gi,j}^2 + e_i \left| \sin \left(g_i (P_{Gi}^{enk} - P_{Gi,j}) \right) \right| \quad (R/h) \quad (3.3)$$

Burada, P_{Gi}^{enk} ; i barasına bağlı termik birimin aktif güç alt üretim sınırı (MW ya da pu), b_i , c_i , d_i , e_i , g_i ise saat başı yakıt maliyeti fonksiyonu sabitleridir. Denklem (3.1) ve Denklem (3.3) beraber düşünüldüğünde KDHKP için amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$F_T = \sum_{j=1}^{j_{enb}} \sum_{i \in N_T} \left[b_i + c_i P_{Gi,j} + d_i P_{Gi,j}^2 + e_i \left| \sin \left(g_i (P_{Gi}^{enk} - P_{Gi,j}) \right) \right| \right] t_j, \quad i \in N_T \quad (R) \quad (3.4)$$

3.2. Sistemdeki Güç Üretim Tüketim Dengesi

KDHKP'de termik birimlerin toplam yakıt maliyeti enküçüklenmeye çalışılırken her bir alt zaman diliminde termik ve hidrolik birimlerin toplam aktif / reaktif güç üretimleri, baralardaki aktif / reaktif yüklerin toplamı ile iletim hatlarındaki aktif / reaktif güç kayıplarını karşılamalıdır (Fadıl vd., 2011).

$$\sum_{i \in N_T} P_{Gi,j} - \sum_{i \in N} P_{yük i,j} - P_{KAYIP,j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in N_T} Q_{Gi,j} - \sum_{i \in N} Q_{yük i,j} - Q_{KAYIP,j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (3.6)$$

Burada, $P_{Gi,j}$ ve $Q_{Gi,j}$; i barasına bağlı üretim biriminin j . alt zaman dilimi boyunca, sırasıyla, aktif ve reaktif güç üretim değerini (MW ve MVar ya da pu), $P_{yük i,j}$ ve $Q_{yük i,j}$; i barasında j . alt zaman dilimi boyunca talep edilen, sırasıyla, aktif ve reaktif yük

değerlerini (MW ve MVA_r ya da pu), $P_{KAYIP,j}$ ve $Q_{KAYIP,j}$; j . alt zaman diliminde iletim hatlarında oluşan, sırasıyla, toplam aktif ve reaktif güç kayıplarını (MW ve MVA_r ya da pu) göstermektedir. Eğer bir sistemde, Denklem (3.5) ve Denklem (3.6) ile belirtilen aktif / reaktif güç üretim – tüketim dengesi sağlanıyorsa, sistemdeki her bir barada sisteme gönderilen net aktif / reaktif güç değerleri sıfır değildir. Başka bir deyişle; her bir bara için, baraya giren aktif / reaktif güç değerleri toplamı, o baradan çıkan aktif / reaktif güç değerleri toplamına eşit olmalıdır. O halde Denklem (3.5) ve Denklem (3.6)'yı aşağıdaki şekilde ifade etmek mümkündür (Fadıl vd., 2011).

$$P_{Gi,j} - P_{yük i,j} - \sum_{k \in N_{Bi}} P_{ik,j} = 0, \quad i=1,2,\dots,N, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (3.7)$$

$$Q_{Gi,j} - Q_{yük i,j} - \sum_{k \in N_{Bi}} q_{ik,j} = 0, \quad i=1,2,\dots,N, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (3.8)$$

Burada, $p_{ik,j}$ ve $q_{ik,j}$; j . alt zaman dilimi boyunca i ve k baraları arasında bağlı olan hat üzerinden i barasından k barasına akan, sırasıyla, aktif ve reaktif güçlerin i barası sınırındaki değerlerini (MW ve MVA_r ya da pu), N ; enerji sistemindeki tüm baraları içeren kümeyi, N_{Bi} ; i barasına bir iletim hattı ile *doğrudan* bağlı olan baraları içeren kümeyi göstermektedir.

3.3. Birimlerin Güç Üretim Sınırları

Sistemdeki aktif / reaktif güç üretim – tüketim dengesi sağlanırken, termik ve hidrolik birimlerin aktif / reaktif güç üretim değerleri, birimlerin sahip olduğu alt ve üst üretim sınırları arasında kalmalıdır (Fadıl ve Urazel, 2013).

$$P_{Gi}^{enk} \leq P_{Gi,j} \leq P_{Gi}^{enb}, \quad i \in \{N_T \cup N_H\}, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (3.9)$$

$$Q_{Gi}^{enk} \leq Q_{Gi,j} \leq Q_{Gi}^{enb}, \quad i \in \{N_T \cup N_H\}, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (3.10)$$

Burada, P_{Gi}^{enk} ve P_{Gi}^{enb} ; i barasına bağlı üretim biriminin, sırasıyla, aktif güç üretim alt ve üst sınırlarını (MW ya da pu), Q_{Gi}^{enk} ve Q_{Gi}^{enb} ; i barasına bağlı üretim biriminin, sırasıyla, reaktif güç üretim alt ve üst sınırlarını (MVA_r ya da pu), N_T ; termik birimlerin bağlı olduğu tüm baraları içeren kümeyi, N_H ; hidrolik birimlerin bağlı olduğu tüm baraları içeren kümeyi göstermektedir. Termik birimler Denklem (3.9) ile verilen alt / üst üretim sınırları arasındaki bazı bölgelerde aktif güç üretimi yaptıklarında mil yataklarında titreşimler oluşabilmektedir. Bu problem de üretim biriminde bir kararsızlığa sebep olmaktadır. Kararsızlığın meydana geldiği bu işletim bölgelerine söz konusu üretim birimine ait yasaklı işletim bölgeleri (*prohibited operation zones*) adı verilmektedir. Bu nedenle termik birimlerin aktif güç üretim değerleri, o birime ait yasaklı işletim bölgeleri dışında olmalıdır (Fang vd., 2014).

$$P_{Gi,j} \notin [poz_{i,m}^-, poz_{i,m}^+], \quad i \in N_T, \quad j=1,2,\dots,j_{enb}, \quad m=1,2,\dots,n_{pozi} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'i aşağıdaki şekilde de ifade etmek mümkündür.

$$P_{Gi,j} \in \{(P_{Gi}^{enk} \leq P_{Gi,j} < poz_{i,1}^-) \cup (poz_{i,1}^+ < P_{Gi,j} < poz_{i,2}^-) \cup \dots \dots \cup (poz_{i,n_{pozi}}^+ < P_{Gi,j} \leq P_{Gi}^{enb}), \quad i \in N_T, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (3.12)$$

Burada, $poz_{i,m}^-$ ve $poz_{i,m}^+$; i barasına bağlı termik birimin m . yasak işletim bölgesinin, sırasıyla, alt ve üst sınırlarını (MW ya da pu), n_{pozi} ; i barasına bağlı termik birimin sahip olduğu toplam yasaklı işletim bölge sayısını göstermektedir.

Bu kısıtlara ek olarak fiziksel ve mekanik sınırlamalardan dolayı, termik birimlerin çıkış güçlerinde çok hızlı artış veya azalma sağlanabilmesi olası değildir. Termik birimlerin aktif güç üretimlerine ait değişim sınırları Denklem (3.13) ve Denklem (3.14) ile verilmektedir (Fang vd., 2014).

$$P_{Gi,j} - P_{Gi,j-1} \leq UR_i, \quad i \in N_T, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (3.13)$$

$$P_{Gi,j-1} - P_{Gi,j} \leq DR_i, \quad i \in N_T, j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (3.14)$$

Burada, UR_i ve DR_i ; i barasına bağılı birim için, sırasıyla, artış rampa oranı (*up ramp rate*) ve azalış rampa oranı değeri (*down ramp rate*) (MW/saat ya da pu/saat)'dir.

3.4. Güvenlik Kısıtları

Sistemdeki her bir iletim hattı belirli bir aktif güç taşıma kapasitesine sahiptir. Eğer bir iletim hattının taşıma kapasitesi aşıllacak olursa, bu hat fiziksel olarak devre dışı kalacak ve bu hattın taşıdığı güç diğeri iletim hatları üzerine dağılacaktır. Bu durumda diğeri hatlar da aşırı yüklenecek ve bundan dolayı devre dışı olacaklardır. Neticede tüm iletim sistemi çökebilecektir (*transmission system black out*). Bundan dolayı bir iletim hattında taşınan aktif güç değeri, hattın taşıma kapasitesinin üzerine çıkmamalıdır (Fadıl vd., 2011).

$$p_{l,j} \leq p_l^{enb}, \quad l \in L, \quad j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (3.15)$$

Burada, $p_{l,j}$; l . iletim hattından j . alt zaman dilimi boyunca akan aktif güç (MW ya da pu), p_l^{enb} ; l . iletim hattının aktif güç taşıma kapasitesi (MW ya da pu), L ; sistemdeki tüm iletim hatlarını içeren kümedir.

Ayrıca baraların gerilim genlikleri, eğer sistemde nominal dışı çevrim oranına sahip trafolar mevcut ise, bu trafolarla ait nominal dışı çevrim oranları ve yine eğer sistemde varsa, SVAR sistemlerinin süseptans değerlerinin de kendileri için belirlenmiş alt / üst sınırlarının arasında kalması gerekir (Fadıl vd., 2011).

$$U_i^{enk} \leq U_{i,j} \leq U_i^{enb}, \quad i = 1, 2, \dots, N, i \neq ref, gk, j = 1, \dots, j_{enb} \quad (3.16)$$

$$a_i^{enk} \leq a_{ik,j} \leq a_i^{enb}, \quad i \in N_{tap}, j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (3.17)$$

$$b_{svari}^{enk} \leq b_{svari,j} \leq b_{svari}^{enb}, \quad i \in N_{svar}, j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (3.18)$$

Burada, $U_{i,j}$; i barasının j . alt zaman dilimi boyunca gerilim genliğini (V yada pu), U_i^{enk} ve U_i^{enb} ; i barasının gerilim genliğinin, sırasıyla, alt ve üst sınırlarını (V yada pu), ref ve gk ; sırasıyla referans ve gerilim kontrollü baralar için kullanılan indisleri, $a_{ik,j}$; i ve k baraları arasına bağlı olan hattın i barası tarafına bağlı nominal dışı çevirme oranına sahip trafonun j . alt zaman dilimindeki çevrim oranı değerini, a_i^{enk} ve a_i^{enb} ; nominal dışı çevrim oranına sahip trafonun nominal dışı çevrim oranının, sırasıyla, alt ve üst sınırlarını, N_{tap} ; sistemdeki tüm nominal dışı çevrim oranına sahip trafoların bağlı olduğu baraları içeren kümeyi, $b_{svari,j}$; i barasına bağlı SVAR sisteminin j . alt zaman dilimindeki süseptans değerini (S ya da pu), b_{svari}^{enk} ve b_{svari}^{enb} ; i barasına bağlı SVAR sistemin süseptans değerinin, sırasıyla, alt ve üst sınırlarını, N_{svar} ; SVAR sistemi bağlı tüm baraları içeren kümeyi göstermektedir.

3.5. Hidrolik Birimlere Ait Kısıtlar

Hidrolik güç üretiminin temelinde, rezervuardaki suyun sahip olduğu potansiyel enerjinin türbinlerde kinetik enerjiye dönüştürülmesi yatmaktadır. Türbinlerde güç üretilirken, üretilecek aktif güç ile orantılı olarak birim zamanda su salımı (*water discharge rate*) gerçekleştirilmektedir. Rezervuarda depolanan suyun potansiyel enerjisi ise, suyun düşü seviyesiyle ve dolayısıyla hacmiyle doğru orantılıdır. Rezervuardaki su hacmi değiştiğinde birim zamanda gerçekleşen su salımı da değişecektir. O halde birim zamanda salınan su miktarı, hidrolik birimin aktif güç üretiminin ve rezervuardaki su hacminin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir.

Ancak rezervuar hacmi büyük birimler için, türbinlerden salınan suyun rezervuardaki su seviyesinde meydana getirdiği değişim ihmal edilebilir. Bu türdeki hidrolik birimler, sabit su düşülü hidrolik birimler (*fixed head hydraulic units*) olarak adlandırılırlar. Sabit su düşülü hidrolik birimler için türbinlerden birim zamanda salınan su miktarı, Denklem (3.20) ile verildiği gibi sadece hidrolik birimlerin ürettiği aktif güç değerlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir (Fadıl ve Yaşar, 2001).

$$q_{GH,i,j} = \begin{cases} d_{1,i} + d_{2,i} P_{Gi,j} & \text{eğer } P_{Gi}^{enk} \leq P_{Gi,j} \leq P_{Gi}^{diz} \\ d_{3,i} + d_{4,i} P_{Gi,j} + d_{5,i} (P_{Gi,j})^2 & \text{eğer } P_{Gi}^{diz} \leq P_{Gi,j} \leq P_{Gi}^{enb} \end{cases}, \quad (3.19)$$

$$i \in N_H, j = 1, 2, \dots, j_{enb}$$

Burada, $q_{GH,i,j}$; i barasına bağlı hidrolik biriminin j . alt zaman dilimindeki saat başına su salınım miktarını (acre-ft/saat), $d_{1,i}$, $d_{2,i}$, $d_{3,i}$, $d_{4,i}$, ve $d_{5,i}$ fonksiyon sabitlerini göstermektedir.

Eğer hidrolik birimin rezervuar hacmi yeteri kadar büyük değil ise, hidrolik güç üretimi sırasında rezervuar hacmindeki ya da başka bir deyişle rezervuar su seviyesindeki (düşüdeki) değişimin aktif güç üretimine etkisi de göz önüne alınmalıdır. Bu türdeki hidrolik birimler, değişken su seviyeli (veya düşülü) hidrolik birimler (*variable head hydraulic units*) olarak adlandırılırlar. Bu durumda hidrolik birimlerin aktif güç üretimleri, Denklem (3.20) ile verildiği gibi, su salımlarının ve rezervuar hacimlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir (Basu, 2014).

$$P_{Gi,j} = C_{1,i} (V_{i,j})^2 + C_{2,i} (q_{GH,i,j})^2 + C_{3,i} (V_{i,j})(q_{GH,i,j}) + C_{4,i} (V_{i,j}) + C_{5,i} (q_{GH,i,j}) + C_{6,i}, \quad i \in N_H \quad (3.20)$$

Burada, $V_{i,j}$; i barasına bağlı hidrolik birimin rezervuarındaki su hacminin j . alt zaman dilimi sonundaki değerini (acre-ft ya da m^3), $C_{1,i}$, $C_{2,i}$, $C_{3,i}$, $C_{4,i}$, $C_{5,i}$ ve $C_{6,i}$ ise fonksiyon sabitlerini göstermektedir.

Daha önce termik birimlere ait aktif güç üretim kısıtlarında anlatıldığı gibi, hidrolik birimlerin su salımı değerleri için alt üst sınırlar ile yasaklı su salım bölgeleri (*prohibited discharge zone*) de probleme dahil edilebilir.

$$q_{Hi}^{enk} \leq q_{GH,i,j} \leq q_{Hi}^{enb}, \quad i \in N_H, j = 1, \dots, j_{enb} \quad (3.21)$$

$$q_{GH,i,j} \notin [pdz_{i,m}^-, pdz_{i,m}^+], \quad i \in N_H, j = 1, 2, \dots, j_{enb}, m = 1, 2, \dots, n_{pdzi} \quad (3.22)$$

$$q_{GH i,j} \in \left\{ \left(q_{Hi}^{enk} \leq q_{GH i,j} < pdz_{i1}^- \right) \cup \left(pdz_{i1}^+ < q_{GH i,j} < pdz_{i2}^- \right) \cup \dots \cup \left(pdz_{in_{pdzi}}^+ < q_{GH i,j} \leq q_{Hi}^{enb} \right) \right\}, \quad i \in N_H, j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (3.23)$$

Burada, q_{Hi}^{enk} ve q_{Hi}^{enb} ; i barasına bağlı hidrolik birimin, sırasıyla, saat başı su salınım değerinin alt ve üst sınırlarını (acre-ft/saat), $pdz_{i,m}^-$ ve $pdz_{i,m}^+$; i barasına bağlı hidrolik birimin m . yasak işletim bۆlgesinin, sırasıyla, alt ve üst sınırlarını (acre-ft), n_{pdzi} ; i barasına bağlı hidrolik birimin sahip olduğu toplam yasaklı su salım bۆlge sayısını gۆstermektedir.

3.6. Su Devamlılık Denklemi

Bir hidrolik birimin belirli bir zaman dilimi sonundaki rezervuar su miktarı, aynı zaman dilimi başındaki rezervuar su miktarı ile bu zaman dilimi boyunca rezervuara gelen net su miktarının toplamına eşittir. O halde i barasına bağlı bir hidrolik birimin rezervuarındaki su miktarının her j alt zaman dilimi sonundaki değeri aşağıdaki şekilde hesap edilebilir (Fadıll ve Yaşar, 2001).

$$V_{i,j}^{son} = V_{i,j}^{başlangıç} + (r_{i,j} - q_{GH i,j} - s_{i,j})t_j, \quad i \in N_H \quad j = 1, \dots, j_{enb} \quad (3.24)$$

Burada, $V_{i,j}^{başlangıç}$ ve $V_{i,j}^{son}$; i barasına bağlı hidrolik birimin rezervuardaki su miktarının, sırasıyla, j . alt zaman dilimi başındaki ve sonundaki değerlerini (acre – ft ya da m^3), $r_{i,j}$; i barasına bağlı hidrolik birimin rezervuarına j . alt zaman dilimi boyunca giren saat başına su miktarını (*inflow rate*) (acre - ft/saat ya da m^3 / saat), $s_{i,j}$; i barasına bağlı hidrolik birimin rezervuarından j . alt zaman dilimi boyunca tahliye edilen (enerji üretmeden salınan) saat başına su miktarını (*spillage discharge rate*) (acre – ft/saat ya da m^3 / saat) gۆstermektedir. Rezervuardaki su miktarının j . alt zaman dilimi başındaki değeri, $(j-1)$. alt zaman dilimi sonundaki değerine eşit olduğu açıktır. O halde Denklem (3.24) aşağıdaki şekilde yazılabilir (Fadıll ve Yaşar, 2001).

$$V_{i,j} = V_{i,j-1} + (r_{i,j} - q_{GH i,j} - s_{i,j})t_j, \quad i \in N_H \quad j = 1, \dots, j_{enb} \quad (3.25)$$

Denklem (3.25), su devamlılık denklemi (*water continuity equation*) olarak adlandırılmaktadır. Eğer sistemdeki hidrolik birimler birbirleriyle hidrolik olarak bağlı (*hydraulically coupled*) ise, su devamlılık denklemi aşağıdaki şekilde genelleştirilebilir:

$$V_{i,j} = V_{i,j-1} + (r_{i,j} - q_{GH_{i,j}} - s_{i,j})t_j + \sum_{m \in N_{H_i}, j > \pi_{mi}} (q_{GH_{m,j-\pi_{mi}}} + s_{m,j-\pi_{mi}})t_{j-\pi_{mi}}, \quad (3.26)$$

$$i \in N_H, \quad j = 1, \dots, j_{enb}$$

Burada, N_{H_i} ; i barasına bağlı hidrolik birimin rezervuarına su salan (*water discharge*) hidrolik birimleri içeren kümeyi, π_{mi} ; m barasına bağlı hidrolik birimden salınan suyun, i barasına bağlı hidrolik birimin rezervuarına ulaşana kadar geçen süreyi (*water transport delay*) (saat ya da alt zaman dilim sayısı) göstermektedir.

3.7. Rezervuar Sınırları

Hidrolik birimlerin rezervuarlarındaki su miktarı, rezervuar kapasitesinin üzerinde olmamalıdır. Su miktarı belli bir seviyenin altında kaldığında ise türbinde güç üretebilmek için gereken su salımı gerçekleşemeyecektir (Fadıl ve Yaşar, 2001).

$$V_i^{enk} \leq V_{i,j} \leq V_i^{enb}, \quad i \in N_H, \quad j = 1, \dots, j_{enb} \quad (3.27)$$

Burada, V_i^{enk} ve V_i^{enb} ; i barasına bağlı hidrolik birimin rezervuarına ait, sırasıyla, su depolama alt ve üst sınırlarını (acre-ft yada m^3) göstermektedir. Hidrolik birimlerin rezervuarlarındaki su miktarlarının başlangıç ve bitiş değerleri bilindiğinden, KDHKP'nin çözümünde aşağıdaki kısıtlar da sağlanmalıdır (Fadıl ve Yaşar, 2001).

$$V_{i,0} = V_i^{başlangıç}, \quad i \in N_H \quad (3.28)$$

$$V_{i,j_{enb}} = V_i^{son}, \quad i \in N_H \quad (3.29)$$

3.8. Güç Akış Denklemleri

KDHKP'nin çözümü için bara gerilim genlikleri ve faz açıları, varsa nominal dışı çevrim oranına sahip trafolara ait çevrim oranları, yine varsa SVAR sistemlerinin süseptans değerleri karar değişkeni olarak seçildiğinde, amaç fonksiyonunun, modeldeki kısıtların, iletim hatlarındaki güç akışlarının vade birimlerin aktif/reaktif güç üretimlerinin karar değişkenleri cinsinden yazılabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Denklem (3.7) ve (3.8)'deki $p_{ik,j}$ ve $q_{ik,j}$ nicelikleri seçilen karar değişkenleri cinsinden ifade edilmelidir (Jegatheesan vd., 2008).

$$p_{ik,j} = U_{i,j}^2 \left(\frac{g_{ik}}{a_{i,j}^2} + g_{shi} \right) - \frac{U_{i,j} U_{k,j}}{a_{i,j}} \left[g_{ik} \cos(\delta_{i,j} - \delta_{k,j}) + b_{ik} \sin(\delta_{i,j} - \delta_{k,j}) \right] \quad (3.30)$$

$$p_{ki,j} = U_{k,j}^2 (g_{ik} + g_{shk}) - \frac{U_{i,j} U_{k,j}}{a_{i,j}} \left[g_{ik} \cos(\delta_{k,j} - \delta_{i,j}) + b_{ik} \sin(\delta_{k,j} - \delta_{i,j}) \right] \quad (3.31)$$

$$q_{ik,j} = -U_{i,j}^2 \left(\frac{b_{ik}}{a_{i,j}^2} + b_{shi} \right) - \frac{U_{i,j} U_{k,j}}{a_{i,j}} \left[g_{ik} \sin(\delta_{i,j} - \delta_{k,j}) - b_{ik} \cos(\delta_{i,j} - \delta_{k,j}) \right] \quad (3.32)$$

$$q_{ki,j} = -U_{k,j}^2 (b_{ik} + b_{shi}) - \frac{U_{i,j} U_{k,j}}{a_{i,j}} \left[g_{ik} \sin(\delta_{k,j} - \delta_{i,j}) - b_{ik} \cos(\delta_{k,j} - \delta_{i,j}) \right] \quad (3.33)$$

Burada, $U_{i,j}$ ve $\delta_{i,j}$; i barasının, sırasıyla, j . alt zaman dilimindeki gerilim genliğini ve faz açısını, $r_{ik} + jx_{ik}$; i ve k baraları arasında yer alan iletim hattının seri empedansını, $g_{ik} + jb_{ik}$; aynı hattın seri admitansını göstermektedir. Bu empedans ve admitans değerleri arasında $g_{ik} + jb_{ik} = 1/(r_{ik} + jx_{ik})$ şeklinde tanımlanabilecek bir ilişki mevcuttur. $g_{shi} + jb_{shi}$; i barasına bağlı şönt admitans değeri, $a_{i,j}$; varsa, i barasına bağlı nominal dışı çevirme oranına sahip trafonun çevrim oranının j . alt zaman dilimindeki değeridir.

Denklem (3.30) - (3.33)'de verilen güç akış değerleri, Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'de yerine konursa, i barasına bağlı birimin j . alt zaman dilimindeki ürettiği aktif ve reaktif güç değerleri, aşağıda verilen denklemlerde olduğu gibi, seçilen karar değişkenleri cinsinden yazılmış olur (Fadıl ve Urazel, 2013).

$$P_{Gi,j} = P_{yük\ i,j} + \sum_{k \in N_{Bi}} P_{ik,j} \quad (3.34)$$

$$Q_{Gi,j} = Q_{yük\ i,j} + \sum_{k \in N_{Bi}} q_{ik,j} \quad (3.35)$$

Sistemdeki iletim hatlarında meydana gelen kayıpları ve sistemin toplam aktif güç kaybını aşağıdaki denklemlerle hesaplamak mümkündür (Fadıl ve Urazel, 2013).

$$P_{ik,j} - P_{kayıp\ ik,j} = -P_{ki,j} \quad (3.36)$$

$$P_{kayıp\ ik,j} = P_{ik,j} + P_{ki,j} \quad (3.37)$$

$$P_{KAYIP,j} = \sum_{l \in L} P_{kayıp\ l,j} = \sum_{i \in N} \sum_{k \in N, k \neq i} P_{ik,j} \quad (3.38)$$

Burada, $P_{kayıp\ ik,j}$; i ve k baraları arasında yer alan iletim hattında, j . alt zaman diliminde meydana gelen termik kaybı (MW ya da pu), $P_{kayıp\ l,j}$; l . iletim hattında j . alt zaman diliminde meydana gelen termik kaybı (MW ya da pu), $P_{KAYIP,j}$; sistemde j . alt zaman dilimindeki toplam termik kaybı (MW ya da pu) göstermektedir.

4. YÖNTEM

Matematiksel modeli bir önceki bölümde incelenmiş olan KDHKP'nin çözümü için F-MSG algoritması kullanılmıştır. Genişletilmiş Lagrange fonksiyonları ile oluşturulmuş ikil (*dual*) problem üzerinde çözüm arayan F-MSG algoritmasının temel fikri, asıl-ikil en iyi amaç fonksiyonu değerinin, problemin uygun olan (*feasible*) ve uygun olmayan (*infeasible*) değerleri yardımıyla bulunmasıdır (Gasimov vd., 2009).

Lagrange temelli optimizasyon yöntemlerinde, kısıtlı optimizasyon problemlerinin çözümündeki ilk adım, en iyi değeri aranılan asıl problemin, Lagrange fonksiyonları kullanılarak, kısıtsız ikil probleme dönüştürülmesidir (Rubinov ve Gasimov, 2002). Optimal çözüm noktasında asıl problemin en küçük değeri ile ikil problemin en büyük değeri birbirine 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 (*augmented*) Lagrange fonksiyonu kullanılmalıdır (Gasimov 2002).

4.1. Genişletilmiş Lagrange Fonksiyonu İkiliği

Genişletilmiş Lagrange fonksiyonları ilk olarak Rockafellar ve Wets (1998) tarafından tanıtılmıştır. Gasimov (2002) klasik Lagrange ikil problemin çözümünde ortaya çıkan ikil aralığın giderilmesini sağlamış ve genişletilmiş Lagrange fonksiyonları için asıl problem ile ikil problemlerin eniyi çözümlerinin eşit olduğunu göstermiştir. Başka bir deyişle sıfır ikil aralık sağlandığını ispat etmiştir.

P , aşağıdaki şekilde tanımlanmış doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olsun.

$$\begin{aligned}
\mathbf{h}(\mathbf{x}) &= \mathbf{0} \\
\mathbf{x} &\in K \\
&\text{kısıtları altında enk } F(\mathbf{x})
\end{aligned} \tag{4.1}$$

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 kümedir. Birincil P problemi için genişletilmiş Lagrange fonksiyonu L , ve ikil fonksiyon H aşağıda gösterilmiştir (Gasimov 2002).

$$\begin{aligned}
L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, c) &= F(\mathbf{x}) + c \|\mathbf{h}(\mathbf{x})\| - \langle \mathbf{u}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) \rangle \\
&= F(\mathbf{x}) + c \left([h_1(\mathbf{x})]^2 + [h_2(\mathbf{x})]^2 + \dots + [h_N(\mathbf{x})]^2 \right)^{1/2} \\
&\quad - (u_1 h_1(\mathbf{x}) + u_2 h_2(\mathbf{x}) + \dots + u_N h_N(\mathbf{x}))
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$$H(\mathbf{u}, c) = \text{enk}_{\mathbf{x} \in K} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, c) \tag{4.3}$$

Burada $u_1, u_2, \dots, u_N \in \mathbb{R}$ ve $c \geq 0$ Lagrange çarpanları ya da ikil değişkenlerdir. Birincil problem P 'nin genişletilmiş Lagrange fonksiyonu kullanılarak oluşturulan kısıtsız ikil problemi D ise aşağıdaki gibi ifade edilir (Gasimov, 2002).

$$\begin{aligned}
&\text{enb} \quad H(\mathbf{u}, c) \\
(\mathbf{u}, c) &\in \mathbb{R}^{N_{ES}} \times \mathbb{R}_+
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Burada N_{ES} ; problemdeki toplam eşitsizlik kısıtı sayısı, \mathbb{R}_+ ; pozitif reel sayılar kümesidir. $H(\mathbf{u}, c)$ ikil fonksiyonu açık olarak yazılabilen bir fonksiyon değildir. Ancak $F(\mathbf{x})$ ve $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ sürekli fonksiyonları ile K kümesi için dışbükey bir fonksiyondur (Üstün, 2007). Bu özellikten dolayı ikil problem D 'nin çözümü için Gasimov (2002) tarafından "Geliştirilmiş Subgradient (MSG) Algoritması" önerilmiştir. Ayrıca çözüm noktasında P ve D problemlerinin eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin eşitliği için gerekli ve yeterli koşullar Gasimov (2002) tarafından verilmiştir.

MSG algoritması literatürde birçok optimizasyon problemine başarıyla uygulanmıştır (Gasimov 2002; Gasimov ve Rubinov, 2004; Burachik vd., 2006; Gasimov ve Üstün, 2005, 2007). Ancak MSG algoritmasının her iterasyonunda genelleştirilmiş Lagrange fonksiyonunun kısıtsız bütünsel (*global*) en iyi değerinin bulunması gerekmektedir. Çoğu problemde Lagrange fonksiyonunun bütünsel en iyi değerinin bulunmasında zorluklar yaşanmakta ve bütünsel en iyi değer yerine yerel en iyi değerler elde edilebilmektedir. Bu durum, optimal çözüme ulaşılmadan MSG algoritmasının durmasına neden olmaktadır. Ayrıca her iterasyonda adım boyutu parametrelerinin güncellenebilmesi için, birincil probleme ait yaklaşık veya kesin olarak bilinen eniyi amaç fonksiyonu değerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu zorlukları aşmak amacıyla Kasimbeyli vd. (2009) tarafından F-MSG algoritması geliştirilmiştir.

4.2. F-MSG Algoritması

Kasimbeyli vd. (2009) tarafından geliştirilmiş olan F-MSG algoritmasının temel fikri, asıl-ikil en iyi amaç fonksiyonu değerinin, uygun olan ve uygun olmayan değerler yardımıyla bulunmasıdır.

Denklem (4.1)'de verilen problem için uygun olan ve uygun olmayan değerleri şu şekilde tanımlamak 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). Bu tanım doğrultusunda, seçilen \tilde{H} değerinin uygun olan veya uygun olmayan bir değer olduğunu kontrol etmek için F-MSG algoritmasının her iterasyonunda aşağıda verilen kısıt sağlama problemine (KSP) çözüm aranmaktadır.

$$F(\mathbf{x}_k) + c_k \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| - \langle \mathbf{u}_k, \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) \rangle \leq H_n \quad (4.5)$$

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

MSG algoritmasının aksine, Lagrange fonksiyonunun kısıtsız bütünsel en iyi değeri yerine, Denklem (4.5)'deki tek bir eşitsizlikten oluşan KSP'ye çözüm aranması ve birincil

probleme ait yaklaşık veya kesin olarak bilinen en iyi amaç fonksiyonu değerine ihtiyaç duyulmaması F-MSG algoritmasının en önemli yeniliğidir (Kasimbeyli vd., 2009).

F-MSG algoritması, genişletilmiş Lagrange ikil fonksiyon için keyfi bir üst sınır seçilmesiyle çalışmaya başlar. Algoritma, seçilen üst sınırın altında uygun çözüm olup olmadığını kontrol eder. Eğer çözüm varsa buna karşı amaç fonksiyonu değeri, yeni üst sınır olarak alınır ve süreç yeniden başlar. Bu süreç, verilen üst sınıra uygun çözüm vermeyen bir sınıra gelinceye kadar devam eder. Uygun çözüm vermeyen sınır, alt sınır olarak alınır ve problemin eniyi çözümü için bir alt ve üst sınır elde edilmiş olur. Daha sonra alt ve üst sınırlar arasındaki aralık, belli bir toleranstan küçük olana kadar daraltılır (Üstün, 2007; Kasimbeyli vd., 2009).

4.2.1. F-MSG algoritmasının adımları

F-MSG Algoritması'nın adımları aşağıdaki gibidir (Kasimbeyli vd., 2009).

1. **Adım:** H_1 sayısını ve sıfırdan büyük ε_1 , ε_2 , Δ_1 , ve M parametrelerini belirle. $n = 1$, $p = 0$, $q = 0$ al. 2. Adım'a git.
2. **Adım:** $(\mathbf{u}_1^n, c_1^n) \in R^{N_{ES}} \times R_+$ olacak şekilde ikil değişkenleri ve $0 < \ell(k) < M$ seç. $k = 1$, $\mathbf{u}_k = \mathbf{u}_1^n$, $c_k = c_1^n$ al. 3. Adım'a git.
3. **Adım:** Seçilen (\mathbf{u}_k, c_k) için Denklem (4.6)'de verilen kısıt sağlama problemini (KSP) çöz.

$$F(\mathbf{x}_k) + c_k \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| - \langle \mathbf{u}_k, \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) \rangle \leq H_n \quad (4.6)$$

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

Eğer Denklem (4.6) için bir çözüm bulunamıyorsa 6. Adıma git. Eğer kısıt sağlama problemi 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, değilse, 4. Adım'a git.

4. Adım: İkili değişkenleri güncelle.

$$\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k - \alpha s_k \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) \quad (4.7)$$

$$c_{k+1} = c_k + (1 + \alpha) s_k \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| \quad (4.8)$$

Burada s_k pozitif adım uzunluğu parametresidir ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$0 < s_k = \frac{\lambda \alpha (H_n - L(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, c_k))}{[\alpha^2 + (1 + \alpha)^2] \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\|^2} \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)'da α ve λ sabit parametrelerdir ve $\alpha > 0$, $0 < \lambda < 2$ sağlayacak şekilde belirlenmelidir. Ayrıca çözümün yakınsayabilmesi için mevcut ikili değişkenlere göre s_k adım uzunluğu aşağıdaki eşitsizliği de sağlamalıdır.

$$(s_k \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| + c_k - \|\mathbf{u}_k\|) > \ell(k) \quad (4.10)$$

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

5. Adım: \mathbf{x}_k , Denklem (4.6)'deki KSP'nin $\|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| \leq \varepsilon_1$ şartını sağlayan bir çözümdür. Bu durumda $L(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, c_k) \cong F(\mathbf{x}_k)$ olur. p 'yi kontrol et. Eğer $p = 0$ ise, $\Delta_{n+1} = \Delta_n$ al, aksi takdirde $\Delta_{n+1} = \Delta_n / 2$ al ve Δ_{n+1} 'i kontrol et. Eğer $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ ise, dur. \mathbf{x}_k en iyi birincil çözümdür. $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ değilse, $H_{n+1} = \min\{F(\mathbf{x}_k), H_n - \Delta_{n+1}\}$, $n = n + 1$, $q = q + 1$ al ve 2. Adım'a git.

6. Adım: Eğer $q = 0$ ise $\Delta_{n+1} = \Delta_n$ al, aksi takdirde $\Delta_{n+1} = \Delta_n / 2$ al ve Δ_{n+1} 'i kontrol et. Eğer $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ ise, dur. Son uygun H_n değeri için Denklem (4.6)'daki KSP'nin,

$\|h(\mathbf{x}_k)\| \leq \varepsilon_1$ şartını sağlayan \mathbf{x}_k çözümü en iyi birincil çözümdür. $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ değilse, $H_{n+1} = H_n + \Delta_{n+1}$, $n = n+1$, $p = p+1$ al ve 2. Adım'a git.

F-MSG algoritmasının iç içe iki döngüden oluştuğu düşünülebilir. Seçilen H_n için KSP'ye ait bir çözümün olup olmadığını bulunmaya çalışıldığı 3. ve 4. Adımlar iç döngüyü oluşturmaktadır. Uygun ve uygun olmayan değerlere göre eniyi asıl-ikil amaç fonksiyonu değerinin bulunduğu aralığın daraltımaya çalışıldığı 2., 5. ve 6. Adımlar da dış döngüyü oluşturmaktadır. n indisi ve k indisi, sırasıyla, dış döngü ve iç döngü için birer sayaçtır. M sayısı ise H_n 'in uygun olup olmadığını tahmin etmek için kullanılan bir sonlandırma toleransıdır.

İç döngüde KSP için $\|h(\mathbf{x}_k)\| \leq \varepsilon_1$ koşulunu sağlayan bir çözüm bulunmuşsa, seçilen H_n 'in uygun olan bir değer olduğu sonucuna varılır. Bu durumda 5. Adıma gidilir. Eğer KSP'yi sağlayan ancak $\|h(\mathbf{x}_k)\| > \varepsilon_1$ olan bir çözüm bulunmuşsa, bu durumda seçilen H_n 'in uygun olan bir değer olduğu sonucuna varılamaz ve ikil değişkenlerin güncellenmesi için 4. Adıma gidilir. İkil değişkenlerin güncellenmesinde kullanılan adım uzunluğu formülasyonları, KSP için elde edilen \mathbf{x}_k çözümlerinin uygun olan bir çözüme yakınsamasını sağlayacaktır. Eğer iç döngüde $l(k) > M$ olana kadar KSP için herhangi bir çözüme erişilemezse, H_n 'in uygun olmayan bir değer olduğu sonucuna varılır. Bu durumda 6. Adıma gidilir (Kasimbeyli vd., 2009).

1. Adım'da seçilen Δ_1 sayısı, dış döngüde H_n 'in güncellenmesinde kullanılan arttırma / azaltma parametresidir. Algoritmanın performansı açısından büyük öneme sahip bu parametre büyük seçildiğinde eniyi asıl-ikil değer olduğu aralık daralacak, küçük seçildiğinde ise bu aralığın yakalanmasında ek işlem sürelerine ihtiyaç duyulacaktır. p ve q sayaçları, çözüm süresince algoritma tarafından oluşturulan uygun olan 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).

4.2.2. Eşitsizlik kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi

F-MSG algoritması sadece eşitlik kısıtları üzerinde çözüm aradığı için, problemdeki her bir eşitsizlik kısıtı bir eşitlik kısıtı şeklinde yazılmalıdır (Kasimbeyli vd., 2009). Bunun için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir.

4.2.2.1. Gevşek değişkenler (slack variables) kullanılarak eşitsizlik kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi

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

$$h(x) = (x - x^+) \leq 0 \quad (4.11)$$

Denklem (4.11)'de verilen $h(x)$ eşitsizlik kısıtı, bu eşitsizliğe pozitif bir değer S^2 , eklenmesiyle aşağıdaki $h_{es}(x, S)$ eşitlik kısıtına dönüştürülebilir.

$$h_{es}(x, S) = (x - x^+ + S^2) = 0 \quad (4.12)$$

Burada S gevşek değişken olup, pozitif ve negatif değerler alabilmesi için, denklemde 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 $h_{es}(x, S) = 0$ kısıtı sağlanır. Böylece Denklem (4.11)'de verilen $h(x)$ eşitsizlik kısıtı, Denklem (4.12)'de verilen $h_{es}(x, S)$ eşitlik kısıtı ile ifade edilmiş olur.

4.2.2.2. “enb” fonksiyonu kullanılarak eşitsizlik kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi

$enb\{a,b\}$ aşağıdaki şekilde tanımlanan bir fonksiyonu olsun (Burachik vd., 2006).

$$enb\{a,b\} = \begin{cases} a, & \text{eğer } a \geq b \\ b, & \text{eğer } b > a \end{cases} \quad (4.13)$$

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

$$h_{eş}(x) = enb\{0, (x - x^+)\} = 0 \quad (4.14)$$

$h(x)$ eşitsizlik kısıtını sağlayan herhangi bir x değişkeni için $(x - x^+) \leq 0$ dır. “enb” fonksiyonu, girdilerinden büyük olanı çıktı olarak ürettiğinden, bu x değişkeni için $enb\{0, (x - x^+)\} = 0$ olacaktır. Bu durumda hem $h(x) \leq 0$ kısıtı, hem de $h_{eş}(x) = 0$ kısıtı sağlanır. Böylece Denklem (4.11)’de verilen $h(x)$ eşitsizlik kısıtı, Denklem (4.12)’de verilen $h_{eş}(x)$ eşitlik kısıtı ile ifade edilmiş olur.

4.3. F-MSG Algoritmasının KDHKP’ne Uygulanması

KDHKP matematiksel olarak büyük boyutlu ve kısıtları doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak modellenmektedir. Ayrıca amaç fonksiyonu ve kısıtlarda dışbükey olmayan ifadelerin bulunması çözümde kullanılacak yöntemin seçilmesini önemli hale getirmekte ve seçilen yöntemlerin probleme doğrudan uygulanmasını zorlaştırmaktadır.

KDHKP’ye ait bütün elektriksel ve hidrolik kısıtlar ile güvenlik kısıtlarınının da sağlandığı tam çözümü elde etmek için bara gerilim genlikleri ve faz açıları, varsa nominal dışı çevrim oranına sahip trafolarla ait çevrim oranları ve yine varsa SVAR sistemlerinin süseptans değerleri karar değişkeni olarak seçilmeli ve bütün işletim süresi boyunca toplam

yakıt maliyeti enküçüklenmelidir. Ancak bu durumda problemin boyutu oldukça büyüyecek ve çözüm zamanı artacaktır.

Büyük boyutlu problemleri daha küçük boyutlu alt problemlere bölerek çözmek, çözüm zamanını azaltmak için kullanılan yöntemlerden biridir. O halde tüm işletim süresi üzerinden KDHKP'yi çözmek yerine, her bir alt zaman dilimindeki optimal güç akış problemi (*optimal power flow problem*) çözülerek problemin çözümüne ulaşılabilir. Ancak böyle bir durumda da, Denklem (3.21) – (3.29) ile verilmiş tüm işletim süresi üzerinde tanımlı hidrolik kısıtların kontrolü mümkün olmayacaktır.

KDHKP'nin çözümünde termik ve hidrolik birimlerin aktif güç üretimleri karar değişkeni olarak seçildiğinde ise sistemin reaktif güç üretim-tüketim dengesi, birimlerin reaktif güç üretim sınırları, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri ve bara gerilim genlik kısıtları modele dahil edilemeyecektir. Ayrıca sistemin toplam aktif güç kaybı ya ihmal edilecek, ya da B-Matris kayıp formülü (*B-Matrix loss formula*) vb. ile yaklaşık olarak hesaplanacaktır. Bu nedenle elde edilen çözüm tam çözüm olmayıp, yaklaşık bir çözüm olacaktır.

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda, F-MSG algoritmasını KDHTKP'ye uygulamak için aşağıdaki yöntemler önerilmiştir.

4.3.1. Sözde su fiyatı kullanarak KDHKP'nin çözümü

KDHTKP'nde amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde değiştirilmiş olsun (Fadıl ve Urazel, 2014);

$$\tilde{F}_T = \sum_{j=1}^{j_{emb}} \sum_{i \in N_T} F_{i,j} t_j + \sum_{i \in N_H} \left[\psi_i \left(\sum_{j=1}^{j_{emb}} q_{GHI,j} t_j - q_{TOPLAM,i} \right) \right] \quad (4.15)$$

Burada ψ_i , i . baraya bağlı hidrolik birimin harcadığı su miktarı için hayali bir ölçekleme katsayısıdır. Bu katsayının birimi, su fiyatıyla (R/m³ veya R/acre-ft) aynı olduğundan sözde (*pseudo*) veya gölge (*shadow*) su fiyatı olarak ta adlandırılmaktadır.

Optimal çözüm noktasında bütün hidrolik birimler için $(\sum_{j=1}^{j_{enb}} q_{GHi,j} t_j) = q_{TOPLAM,i}$

olacağından, Denklem (4.1) ile verilen değiştirilmiş amaç fonksiyonunun optimal değeri

sistemin aranan optimal amaç fonksiyonu değerine eşit olur ($\tilde{F}_T = \sum_{j=1}^{j_{enb}} \sum_{i \in N_T} F_{i,j} t_j = F_T$).

Bundan dolayı ψ_i katsayılarını değiştirerek hidrolik birimlerin harcadığı su miktarlarının kontrol edildiği iteratif bir yöntem önerilebilir. Önerilen bu yöntemin adımları şöyledir;

1. Adım: $iter = 1$ al. Herbir hidrolik birim için bir ψ_i^{iter} değeri seç. $neg_i = 0$, $pos_i = 0$ yap ve 2. Adım'a git.

2. Adım: Denklem (4.1)'de verilen amaç fonksiyonunu kullanarak her bir alt zaman dilimindeki OPF problemini F-MSG algoritması kullanarak teker teker çöz.

3. Adım: Elde edilen çözüm noktasında herbir hidrolik birim için $hata_i = (\sum_{j=1}^{j_{enb}} q_{GHi,j} t_j) - q_{TOPLAM,i}$ değerlerini hesapla. Eğer tüm hidrolik birimler için $|hata_i| \leq TOL_i$ sağlanıyorsa, dur. Elde edilen çözüm KDHKP için optimal çözümdür. Aksi durumda $|hata_i| \leq TOL_i$ koşulu sağlanan hidrolik birimlerin aktif güç üretimlerini 2. Adım'da elde edilen değerlerde sabit tut ve 4. Adım'a git.

4. Adım: $|hata_i| \leq TOL_i$ koşulu sağlamayan hidrolik birimler için sözde su fiyatı değerini güncelle.

- a) $hata_i > 0$ olan hidrolik birimler için $neg_i = 0$ ise $\psi_i^{iter+1} = 2\psi_i^{iter}$, değilse $\psi_i^{iter+1} = 0.5(\psi_i^{üst} + \psi_i^{iter})$ olarak sözde su fiyatı değerini güncelle. $\psi_i^{alt} = \psi_i^{iter}$, $pos_i = 1$, $iter = iter + 1$ yap ve 2. Adım'a git.

- b) $hata_i < 0$ olan hidrolik birimler için $pos_i = 0$ ise $\psi_i^{iter+1} = 0.5 \psi_i^{iter}$, değilse $\psi_i^{iter+1} = 0.5 (\psi_i^{iter} + \psi_i^{alt})$ olarak sözde su fiyatı değerini güncelle. $\psi_i^{ist} = \psi_i^{iter}$ ve $neg_i = 1$, $iter = iter + 1$ yap ve 2. Adım'a git.

1. Adım'da herbir hidrolik birim için bir ψ_i katsayısı seçildikten sonra 2. Adım'da Denklem (4.1)'de verilen amaç fonksiyonu kullanılarak tüm alt zaman dilimlerinde ayrı ayrı OPF problemi çözülmektedir. Elde edilen çözüm noktası için 3. Adım'da tüm hidrolik birimlere ait $hata_i = \left(\sum_{j=1}^{j_{enb}} q_{GHi,j} t_j \right) - q_{TOPLAM,i}$ değerleri hesaplanmaktadır.

Hesaplanan $hata_i$ değerlerine göre ψ_i katsayıları 4. Adım'da güncellenmektedir. $hata_i$ değeri sıfırdan küçük olan bir hidrolik birimin harcadığı su miktarı arttırılmalıdır. Benzer şekilde $hata_i$ değeri sıfırdan büyük olan bir hidrolik birimin harcadığı su miktarı ise azaltılmalıdır. Pozitif ve negatif $hata_i$ değerleri bulunduktan sonra yeni ψ_i değeri, pozitif ve negatif $hata_i$ değerlerinin elde edildiği ψ_i değerlerinin ortalaması olarak (bisection method) hesaplanmaktadır. Algoritmanın başlangıcında her bir hidrolik birim için bir pozitif ve bir de negatif $hata_i$ değeri veren iki ψ_i değeri yakalamak için pos_i ve neg_i değişkenleri (bayrakları) kullanılmıştır. pos_i veya neg_i bayrağının sıfır değer alması i . hidrolik birim için pozitif veya negatif $hata_i$ değeri veren sözde su fiyatı değerinin bulunmadığı anlamına gelmektedir. pos_i ve neg_i bayraklarının bir değeri almaları ise i . hidrolik birim için pozitif ve negatif $hata_i$ değeri veren sözde su fiyatı değerleri bulunduğu anlamına gelmektedir. Güncellenen yeni ψ_i değerleri ile tekrardan bütün alt zaman dilimlerinde ayrı ayrı OPF problemi çözülmektedir ve bütün hidrolik birimler için $|hata_i| \leq TOL_i$ koşulunun sağlandığı bir çözüm elde edilene kadar iterasyonlar devam etmektedir (Fadıl ve Urazel, 2014).

4.3.2. Yaklaşık model ve tam modelin beraber kullanıldığı iteratif yöntem

Önerilen yöntemde KDHTKP'nin çözümü için, problemin yaklaşık ve tam modelleri beraber kullanılmaktadır. Önerilen bu yöntemin adımları aşağıdaki şekilde verilebilir (Fadıl ve Urazel, 2015).

1. Adım: Sistemin enküçük yakıt maliyetli çözümünden daha aşağıda yakıt maliyetine sahip bir çözüm bul.

- a) $iter=0$ al.
- b) (3.21) - (3.29) nolu Denklemler ile verilen hidrolik kısıtlar göz önünde bulundurulmadan, bara gerilim genliklerini ve bara faz açılarını, varsa nominal dışı çevrim oranına sahip trafolara ait çevrim oranlarını ve yine varsa SVAR sistemlerinin süseptans değerlerini karar değişkeni olarak seç. F-MSG algoritması ile tüm alt zaman dilimlerindeki OPF problemlerini çöz.
- c) Elde edilen çözüm noktasında termik birimlerin toplam yakıt maliyeti $F_{OPT}^{*(iter)}$ ve her alt zaman dilimindeki aktif güç kaybı değerlerini $P_{KAYIP,j}^*$ hesapla ve 2. Adım'a git.

$$F_{OPT}^{*(iter)} = \sum_{j=1}^{j_{enb}} \sum_{i \in N_T} F_i(P_{Gi,j})t_j \quad (4.16)$$

$$P_{KAYIP,j}^* = P_{KAYIP,j}, \quad j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (4.17)$$

2. Adım: Yaklaşık model kullanarak hidrolik birimler için aktif güç dağıtımını problemini aşağıda gösterildiği gibi çöz.

- a) $iter=iter+1$ yap.

- b) 1. Adım'da elde edilen $F_{OPT}^{*(iter)}$ ve $P_{KAYIP,j}^*$ değerleriyle, termik ve hidrolik birimlerin aktif güç üretim değerlerini karar değişkeni olarak seçerek, aşağıda verilen alt problemi çöz. *Eğer problemde değişken düşülü hidrolik birimler varsa, bu birimlerin aktif güç üretim değerleri yerine saat başı su salımı değerlerini karar değişkeni olarak seç* (Bakınız Denklem (3.20)).

$$\sum_{i \in N_T} P_{Gi} + \sum_{k \in N_H} P_{Gk} - P_{kayıp,j}^* - P_{YÜK,j} = 0, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (4.18)$$

$$P_{Gi}^{enk} \leq P_{Gi,j} \leq P_{Gi}^{enb}, \quad i \in \{N_T \cup N_H\}, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (4.19)$$

$$V_i^{enk} \leq V_{i,j} \leq V_i^{enb}, \quad i \in N_H, \quad j=1,\dots,j_{enb} \quad (4.20)$$

$$V_{i,j} = V_{i,j-1} + (r_{i,j} - q_{GHi,j} - s_{i,j})t_j + \sum_{m \in N_{Hi}, j > \pi_{mi}} (q_{GHm,j-\pi_{mi}} + s_{m,j-\pi_{mi}})t_{j-\pi_{mi}}, \quad (4.21)$$

$$i \in N_H, \quad j=1,\dots,j_{enb}$$

$$q_{Hi}^{enk} \leq q_{GHi,j} \leq q_{Hi}^{enb}, \quad i \in N_H, \quad j=1,\dots,j_{enb} \quad (4.22)$$

$$V_{i,0} = V_i^{başlangıç}, \quad i \in N_H \quad (4.23)$$

$$V_{i,j_{enb}} = V_i^{son}, \quad i \in N_H \quad (4.24)$$

$$\text{kısıtları altında } enk \left(\sum_{j=1}^{j_{enb}} \sum_{i \in N_T} F_i(P_{Gi,j})t_j \right) - F_{OPT}^{*(iter)} \quad (4.25)$$

- c) Elde edilen çözüm noktasında hidrolik birimlerin aktif güç üretim değerlerini aşağıda verildiği gibi sakla ve 3. Adım'a git.

$$P_{Gi,j}^{**} = P_{Gi,j}, \quad i \in N_H, \quad j=1,2,\dots,j_{enb} \quad (4.26)$$

3. Adım: Tam modeli kullanarak KDHKP'ya ait tüm kısıtların sağlandığı tam çözümü aşağıda gösterildiği gibi bul.

- a) Sistemdeki hidrolik birimlerin aktif güç üretimlerini, 2. Adım'da bulunan değerlerinde sabit tut.

$$P_{Gi,j} = P_{Gi,j}^{**}, \quad i \in N_H, \quad j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (4.27)$$

- b) (3.21) - (3.29) nolu Denklemler ile verilen hidrolik kısıtlar göz önünde bulundurulmadan, bara gerilim genliklerini ve faz açılarını, varsa nominal dışı çevrim oranına sahip trafoların çevrim oranlarını, ve yine varsa SVAR sistemlerinin süseptans değerlerini karar değişkeni olarak seç ve F-MSG algoritması yardımıyla tüm alt zaman dilimlerindeki OPF problemlerini teker teker çöz.

- c) Elde edilen çözüm noktasında termik birimlerin toplam yakıt maliyetini $F_{OPT}^{*(iter)}$ ve her alt zaman dilimdeki aktif güç kaybı değerlerini $P_{KAYIP,j}^*$ hesapla

$$F_{OPT}^{*(iter)} = \sum_{j=1}^{j_{enb}} \sum_{i \in N_T} F_i(P_{Gi,j})t_j \quad (4.28)$$

$$P_{KAYIP,j}^* = P_{KAYIP,j}, \quad j = 1, 2, \dots, j_{enb} \quad (4.29)$$

- d) $iter=1$ ise, 2. Adım'a git. Değilse, aşağıda verilen *azalma* değerini hesapla.

$$azalma = F_{OPT}^{*(iter)} - F_{OPT}^{*(iter-1)} \quad (4.30)$$

- e) $azalma < 0$ ise, 2. Adım'a git. $azalma > 0$ ise, dur, $F_{OPT}^{*(iter-1)}$ KDHTKP'nin çözümüdür.

1. Adım'daki hesaplamalar, F-MSG yönteminin ihtiyaç duyduğu, sistemin en küçük yakıt maliyetli çözümünden daha aşağıda yakıt maliyetine sahip, geçerli olmayan

(*infeasible*) bir çözüm bulmak için yapılmaktadır. Böyle bir çözümde termik birimler olabildiğince düşük ve dolayısıyla hidrolik birimler de olabildiğince yüksek değerlerde aktif güç üretmelidirler. Bu nedenle, aktif güç üretim sınırları hariç, hidrolik birimlere ait hidrolik kısıtlar göz önünde bulundurulmadan herbir alt zaman dilimindeki OPF problemi sırasıyla çözülmektedir. OPF problemlerinin çözümünde temel olarak bara gerilimleri ve faz açıları karar değişkenleri olarak seçildiğinden, elde edilen çözüm noktasında bütün elektriksel kısıtlar ile güvenlik kısıtları sağlanmaktadır. Ancak hidrolik kısıtlar kontrol edilmediğinden ve bu nedenle kısıtların üst limitleri aşıldığından elde edilen çözüm KDHKP için geçerli (*feasible*) bir çözüm değildir ve sadece önerilen yöntem için bir başlangıç noktası teşkil etmektedir (Fadıl ve Urazel, 2015).

2. Adım'da, toplam yakıt maliyetinin 1. Adım'dakine yakın olduğu ve hidrolik kısıtların sağlandığı, yeni bir aktif güç dağıtımı yapılmaktadır. Bunun için, sistemdeki birimlerinin tüm alt zaman dilimlerindeki aktif güç üretim değerleri karar değişkenleri seçilerek, bir önceki adımda elde edilen aktif güç kayıpları kullanılarak, tüm işletim süresine ait güç dağıtım problemi yaklaşık model kullanılarak çözülmektedir. Ancak burada kullanılan model reaktif güç üretim-tüketim dengesini, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasitelerini ve güvenlik kısıtlarını içermediğinden elde edilen çözüm KDHKP için yaklaşık bir çözümdür (Fadıl ve Urazel, 2015).

2. Adım'da elde edilen çözüm noktasına ait aktif güç üretimlerinin (3.21) - (3.29) nolu Denklemler ile verilen hidrolik kısıtları sağladığı açıktır. O halde, hidrolik birimlerin aktif güç üretimleri 2. Adım'da elde edilen değerlerde sabit tutulup, bara gerilimleri ve faz açılarını, nominal dışı çevrim oranına sahip trafoların çevrim oranlarını ve SVAR sistemlerine ait süseptans değerlerini karar değişkenleri olarak tüm alt zaman dilimlerindeki OPF problemleri çözümlerse, bütün kısıtların sağlandığı tam bir çözüm elde edilebilir. Bu nedenle 3. Adım'da elde edilen çözüm KDHKP için tam çözümdür (Fadıl ve Urazel, 2015).

2. Adım ve 3. Adım birlikte çözüm yönteminin bir iterasyonu olarak kabul edilebilir. Her bir iterasyon sonunda 3. Adım'da elde edilen çözüm, KDHKP için bütün kısıtların sağlandığı bir tam çözümdür. Birbirini takip eden iterasyonlar için, tam çözümlere ait toplam yakıt maliyet değerlerinde bir azalma gerçekleşmiyorsa iterasyonlara

son verilir. En düşük yakıt maliyetine sahip tam çözüm, KDHKP için optimal çözümdür (Fadıl ve Urazel, 2015).

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yöntemler bölümünde detaylı olarak açıklanmış olan metotlar çeşitli KDHKP örneklerine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Bütün uygulamalarda F-MSG algoritması MATLAB programı kullanılarak kodlanmış, F-MSG algoritmasının 3. Adımında Denklem (2.6) ile verilen kısıt sağlama probleminin çözümünde GAMS programı ve Conopt çözücüsü (*solver*) kullanılmıştır. Yine bütün uygulamalarda F-MSG algoritmasının 3. Adımında yer alan kısıt sağlama problemi, aşağıda verilen problem yardımıyla çözülmüştür (Kasimbeyli vd., 2009).

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, c) - H_n &\leq 0 \\ \mathbf{x} &\in K \\ \text{kısıtları altında en } r &= 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Burada r hayali bir amaç fonksiyonu olup sıfır veya herhangi bir sabit sayı olarak alınabilir (Kasimbeyli vd., 2009). Denklem (5.1) ile verilen problemin çözümüyle elde edilen sonuçlar $L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, c) - H_n \leq 0$ eşitsizliğini sağlamaktadır ve dolayısıyla F-MSG algoritmasının 3. Adımındaki KSP problemi için de bir çözüm olmaktadır.

F-MSG algoritması sadece eşitlik kısıtları üzerinde çözüm aradığı için, problemdeki her bir eşitsizlik kısıtı bir eşitlik kısıtı şeklinde yazılmalıdır. Bütün uygulamalarda matematiksel modelde yer alan bütün eşitsizlik kısıtları, Bölüm 4.2.2.2’de anlatılan ve “*enb*” fonksiyonunun kullanıldığı yöntem ile eşitlik kısıtlarına dönüştürülmüştür.

5.1. Sözde Su Fiyatı Kullanarak KDHKP’nin çözümü

Sözde su fiyatı kullanarak KDHKP’nin çözümü için önerilen yöntem, 5 adet termik ve 1 adet hidrolik birim içeren 12 baralı bir test sisteminde denenmiştir (Fadıl ve Urazel, 2014). 24 saatlik işletim süresi, her biri 4 saatlik, 6 adet alt zaman dilimine bölünmüştür. Sisteminin tek hat diagramı Şekil A.1’de, hat parametreleri Çizelge A.1’de, sistemin aktif ve reaktif yük dağılımı Çizelge A.2’de, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri ise Çizelge A.5’de verilmiştir.

Sistemdeki hidrolik birim pompayla doldurmalı bir hidrolik birim olarak alınmıştır. Klasik kullanımda, pompayla doldurmalı bir hidrolik birim yük talebinin düşük olduğu alt zaman dilimlerinde motor / pompa olarak çalışmakta ve yüksekte bulunan üst rezervuara su pompalamaktadır. Yük talebinin yüksek olduğu alt zaman dilimlerinde ise, birim generatör / türbin olarak çalışmakta ve üst rezervuarda depolanan suyu harcayarak elektrik enerjisi üretmektedir (Fadıl ve Yaşar, 2000). İşletim süresi başında ve sonunda pompayla doldurmalı birimin üst rezervuarındaki su miktarı birbirine eşit olmalıdır. Başka bir deyişle bu birimin işletim süresi boyunca harcayacağı net su miktarı sıfır olmalıdır (Fadıl ve Yaşar, 2000).

Pompayla doldurmalı bir hidrolik birim P_{PH} pompalama gücüyle (çözüm işleminde bu güç negatif bir değer olarak (üretim) bulunmaktadır) üst rezervuarına bir saatte V hacminde su pompalasin. Yine bu hidrolik birimde depolanan V su hacmi bir saatte kullanılarak P_{GH} gücü üretilsin. Sözkonusu pompayla doldurmalı hidrolik birimde $P_{GH} < |P_{PH}|$ olacaktır. O halde pompayla doldurmalı hidrolik birimler için $\eta = \frac{P_{GH}}{|P_{PH}|}$ şeklinde tanımlanabilecek bir çevrim verimi (*cycle efficiency*) değeri mevcuttur ve bu verim değeri her zaman birden küçüktür (Fadıl ve Yaşar, 2000). Sistemdeki pompayla doldurmalı hidrolik birimin saat başına su salınım fonksiyonu sabitleri ve saat başına su pompalama fonksiyonu sabitleri Denklem 5.2’de verilmiştir.

$$q_{GH,j}(P_{GH,j}) = \begin{cases} 200 + 2.0P_{GH,j} & (acre - ft) & \text{eğer } 0 < P_{GH,j} \leq 130MW \\ 0 & (acre - ft) & \text{eğer } P_{GH,j} = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$q_{PH,j}(|P_{PH,j}|) = \begin{cases} 200 + \mu |P_{PH,j}| & (acre - ft) & \text{eğer } 0 < |P_{PH,j}| \leq 130MW \\ 0 & (acre - ft) & \text{eğer } |P_{PH,j}| = 0 \end{cases}$$

Burada μ sabiti, $\eta = 0,60$ için $6/5$, $\eta = 0,67$ için $4/3$, $\eta = 0,75$ için $3/2$ değerini almaktadır. Pompayla doldurmalı hidrolik birimin rezervuarındaki su miktarının alt ve üst sınırları, sırasıyla, 5000 ve 15000 *acre - ft* olarak alınmıştır. İşletim süresinin başlangıcında ve sonunda rezervuarda depolanacak su miktarı ise $V_{i,0} = V_{i,6} = 10000$ *acre - ft* olarak alınmıştır.

Sözde su fiyatı yönteminin pompayla doldurmalı hidrolik birime uygulanabilmesi için j . alt zaman diliminde enküçüklenecek amaç fonksiyonu Denklem 5.3’de verilmiştir

$$\tilde{F}_{T,j} = \begin{cases} \sum_{i \in N_T} F_{i,j} t_j + \psi q_{GH,j} t_j, & \text{eğer } j \in J_{GEN} \\ \sum_{i \in N_T} F_{i,j} t_j - \psi q_{PH,j} t_j, & \text{eğer } j \in J_{POMP} \end{cases} \quad (5.3)$$

Burada J_{GEN} ve J_{POMP} , sırasıyla, pompayla doldurmalı hidrolik birimin jeneratör ve motor olarak çalıştığı alt zaman dilimlerini içeren ayrık kümeler, $q_{GH,j}$ ve $q_{PH,j}$, sırasıyla, pompayla doldurmalı hidrolik birimin j . alt zaman dilimindeki saat başı su salımı ve su pompalama fonksiyonlarıdır. Bütün işletim süresi boyunca pompayla doldurmalı hidrolik birimin harcadığı net su miktarı ise Denklem 5.4 ile hesaplanabilir.

$$q_{HARCANAN,NET} = \sum_{j \in J_{GEN}} q_{GH,j} t_j - \sum_{j \in J_{POMP}} q_{PH,j} t_j \quad (5.4)$$

Önerilen yöntemde, seçilen ψ katsayısı için Denklem 5.3’de verilen amaç fonksiyonu ile herbir alt zaman diliminde teker teker OPF problemi çözülmektedir. ψ yüksek değerler aldığı anda pompayla doldurmalı hidrolik birim düşük yük talebinin olduğu alt zaman dilimlerinde çok daha fazla su pompalayacak, yüksek yük talebinin olduğu alt zaman dilimlerinde ise çok daha az su harcayacaktır. Dolayısıyla pompayla doldurmalı hidrolik birimin işletim süresi boyunca harcadığı net su miktarı negatif olacaktır (Bkz. Denklem 5.4). Buna karşılık ψ düşük değerler aldığı anda pompayla doldurmalı hidrolik birim yüksek yük talebinin olduğu alt zaman dilimlerinde çok daha fazla su harcayacak, düşük yük talebinin olduğu alt zaman dilimlerindeyse çok daha az su pompalayacaktır. Dolayısıyla pompayla doldurmalı hidrolik birimin işletim süresi boyunca harcadığı net su miktarı pozitif olacaktır (Bkz. Denklem 5.4). Önerilen yöntemin amacı $q_{HARCANAN,NET} = 0$ sağlandığı optimal ψ değerinin bulunmasıdır. Bu optimal değer bulunduğunda, Denklem 5.3’de verilen amaç fonksiyonlarının alt zaman dilimlerindeki toplamı, işletim süresindeki optimal yakıt maliyetine eşit olacaktır (Bkz. Denklem 5.5) (Fadıl ve Urazel, 2014).

$$\sum_{j=1}^{j_{enb}} \tilde{F}_{T,j} t_j = \sum_{j=1}^{j_{enb}} F_{T,j} t_j + \psi \left[\sum_{j \in J_{GEN}} q_{GH,j} t_j - \sum_{j \in J_{POMP}} q_{PH,j} t_j \right] \quad (5.5)$$

Örnek problem çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak modellenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak termik birimlerin toplam yakıt maliyeti yerine Denklem 5.6'de verildiği gibi ağırlıklı toplamla birleştirilmiş F_{TOT} fonksiyonu kullanılmıştır (Fadıl ve Urazel, 2014).

$$F_{TOT} = wF_T + \xi(1-w)E_T \quad (R), \quad 0 \leq w \leq 1 \quad (5.6)$$

Burada ξ (R/kg veya R/ton) olarak emisyon maliyeti, F_T termik birimlerin toplam yakıt maliyeti (R), E_T termik birimlerin toplam emisyon miktarı (kg veya ton), w ise $0 \leq w \leq 1$ şeklinde değişen ağırlık faktörüdür. $w=1$ için elde edilen optimal çözümde sadece termik birimlerin toplam yakıt maliyeti enküçüklenirken, $w=0$ değeri için ise sadece termik birimlerin emisyon miktarı, ya da emisyon maliyeti enküçüklenmektedir. Bu durumda seçilen iki amacın birbiri ile zıt olduğunu söylemek mümkündür. Sistemdeki termik birimlerin saat başı emisyon fonksiyon sabitleri Çizelge A.4'de verilmiştir. Denklem 5.6'da yer alan ξ sabiti ise $1000 R/ton$ olarak alınmıştır.

Bu tür çok amaçlı optimizasyon problemlerinde bir tek çözüm yoktur, ancak alternatif çözümler kümesi vardır. Bu alternatif çözümler kümesinin elemanları için bütün amaçlar düşünüldüğünde hiçbirinin diğerlerine göre daha iyi bir çözüm olduğu söylenemez. Bu tür çözümlere "Pareto - Optimal" çözümler denir (Abido, 2009). Probleme ait pareto - optimal çözüm kümesi, Denklem 5.6'de verilen w ağırlık faktörünün belirlenen her bir değeri için KDHKP'nin çözülmesiyle elde edilmektedir. Sistemdeki termik birimlerin saat başı yakıt maliyeti fonksiyonları ve bunlara ait sabitleri Çizelge A.3'de verilmiştir.

Sistemde 1 nolu bara referans bara 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 ve üst sınırları, sırasıyla, $0,90 pu$ ve $1,10 pu$ seçilmiştir. Termik birimler 1, 4, 7, 9 ve 11 nolu baralara, pompayla doldurmalı hidrolik birim ise 6 nolu baraya bağlıdır. Problemin çözümünde, 9 ve 11 nolu baralara bağlı termik birimlerin yakıt maliyetleri

yüksek olduğundan bu birimlerin aktif güç üretimleri alt üretim sınırlarının altına indiğinde birimlerin aktif güç üretimleri sıfır alınmakta ve bu birimler senkron kompansatör olarak çalıştırılmaktadır (Fadıl ve Urazel, 2014). Sistemdeki pompayla doldurmalı hidrolik birimin üç farklı çevrim verimi değeri için ($\eta = 0,60, 0,67, 0,75$) ele alınan çok amaçlı probleme ait pareto optimal çözümler elde edilmiştir. Pareto optimal çözümleri elde etmek için önerilen yöntem ile her bir $w = 0,1, 0,2, 0,3, \dots, 0,8, 0,9, 1,0$ değeri için KDHKP çözülmüştür.

F-MSG algoritmasında kullanılacak parametreler $\alpha = 100$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_1 = 5 \times 10^{-5}$, $\varepsilon_2 = 0,05$, $\Delta_1 = 100 R/h$ ve $M = 150$ olarak alınmıştır. İkili değişkenlerin başlangıç değerleri ise $c_1^1 = 4500$ ve $u_j^1 = [0, 0, \dots, 0]_{(1 \times 59)}$ seçilmiştir. F-MSG algoritmasının 4. Adımında iterasyon sayısının sınırlandırılmasında kullanılan $\ell(k)$ fonksiyonu $\ell(k) = k$ olarak tanımlanmıştır.

F-MSG algoritmasının adımlarını açıklayabilmek için pompayla doldurmalı birimin devre dışı olduğu durumda $w = 0,5$ için 3. alt zaman dilimindeki optimal güç akış probleminin çözümü incelenmiş ve çözüm sırasında üretilen uygun ve uygun olmayan değerler Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.1'de verildiği üzere seçilen başlangıç üretim değerleri ile saat başı maliyet değeri $F_T^0 = 1374,6489 R/h$ olarak hesaplanmıştır (Fadıl ve Urazel, 2014). Başlangıç üretim değerleri bu saat başı maliyet değerini sağladığından bu değer uygun (*feasible*) bir değer olduğu açıktır. Bu sebeple birinci adımda $H_1 \leq F_T^0$ olacak şekilde $H_1 = 1250 R/h$ seçilmiştir. ve bu değer uygun bir değer olup olmadığı kontrol edilmiştir. $H_1 = 1250 R/h$ 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 $F_T^1 = 1208,3671 R/h$ olarak hesaplanmıştır. $H_1 - \Delta_1 = 1150 R/h$ değeri, F_T^1 den küçük olduğundan $H_2 = H_1 - \Delta_1 = 1150$ olarak seçilmiş ve ikinci dış döngüde bu H_2 değerinin uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Altıncı dış döngü sonucunda, ilk kez uygun olmayan (*infeasible*) bir maliyet değerine ulaşılmıştır. Bu durumda $H_7 = H_6 + \Delta_6 = 800$ olarak seçilmiştir. Altıncı ve sonraki tüm dış döngülerde $\Delta_{n+1} = 1/2\Delta_n$ olarak hesaplanmıştır. Onaltıncı dış döngü sonucunda, saat başı maliyet için artırım değeri

$\Delta_{12} = +0,048828125 R/h$ olarak hesaplanmıştır. Δ_{12} , durma kriteri $\varepsilon_2 = 0,05$ 'den küçük olduğu için algoritma durdurulmuştur. Algoritmada son uygun değer için hesaplanmış olan saat başı maliyet değeri $F_T^{15} = 810,6868 R/h$, ilgili alt zaman dilimindeki optimal güç akış probleminin çözümü olarak alınmıştır.

Çizelge 5.1. $w = 0,5$ için 3. zaman dilimindeki OPF çözümü sırasında 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)
0	1374,6489	-	-	-	-
1	1250	Uygun	1208,3671	-100	1150
2	1150	Uygun	1128,8206	-100	1050
3	1050	Uygun	1036,1743	-100	950
4	950	Uygun	940,1991	-100	850
5	850	Uygun	846,0027	-100	750
6	750	Uygun Olmayan	-	+50	800
7	800	Uygun Olmayan	-	+25	825
8	825	Uygun	823,5611	-12,5	812,5
9	812,5	Uygun	810,9971	-6,25	806,25
10	806,25	Uygun Olmayan	-	+3,125	809,375
11	809,375	Uygun Olmayan	-	+1,5625	810,9375
12	810,9375	Uygun	810,8126	-0,78125	810,15625
13	810,15625	Uygun Olmayan	-	+0,390625	810,54687
14	810,54687	Uygun Olmayan	-	+0,1953125	810,74218
15	810,74218	Uygun	810,6868	-0,09765625	810,64453
16	810,64453	Uygun Olmayan	-	+ 0,048828125	

$w = 1,0$ ve $\eta = 0,75$ değerleri için, sözde su fiyatı değerindeki değişime karşılık, Denklem 5.4 ile verilen pompayla doldurmalı hidrolik birimin harcadığı net su miktarında meydana gelen değişimler Çizelge 5.2'de verilmiştir. Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi birinci iterasyonda $\psi_6^1 = 1$ seçilmiştir. $\psi_6^1 = 1$ için her bir alt zaman diliminde ayrı ayrı optimal güç akış problemi çözülmüş ve elde edilen çözüm noktasında pompayla doldurmalı hidrolik birimin harcadığı net su miktarı 427,3815 acre-ft olarak hesaplanmıştır. Pompayla doldurmalı hidrolik birimin harcaması gereken net su miktarının sıfır olması gerektiğinden,

birinci iterasyon için $hata_i = 427,3815 - 0 = 427,3815$ acre-ft olarak hesaplanmıştır. $hata_i > 0$ olduğundan $\psi_6^2 = 1,50 \times \psi_6^1 = 1,50$ olarak arttırılmış ve ikinci iterasyona geçilmiştir. Üçüncü iterasyonda ilk kez negatif bir $hata$ değeri elde edilmiştir. Bu durumda dördüncü iterasyon için ikiye ayırma (*bisection*) yöntemi ile $\psi_6^4 = 0,50 \times (\psi_6^2 + \psi_6^3) = 1,875$ hesaplanmıştır. Takip eden tüm iterasyonlarda sözde su fiyatı değeri ikiye ayırma yöntemi kullanılarak güncellenmiştir. Dokuzuncu iterasyon sonunda $|hata_9|$ değeri başlangıçta belirlenmiş tolerans değeri $TOL_6 = 0,01$ acre - ft 'den küçük olduğundan iterasyona son verilmiştir.

Çizelge 5.2. $w = 1,0$ ve $\eta = 0,75$ için sözde su fiyatı değerindeki değişime karşılık pompayla doldurmalı hidrolik birimin harcadığı net su miktarındaki değişim (acre-ft olarak).

<i>iter</i>	ψ_6^{iter}	$q_{HARCANAN,NET}$
1	1	427,3815
2	1,50	218,0081
3	2,25	-191,1730
4	1,875	125,7930
5	2,0625	-42,2814
6	1,96875	-11,6255
7	1,921875	-3,1200
8	1,8984375	0,1075
9	1,91015625	-0,0095

$w = 1,0$ ve $\eta = 0,75$ verim değeri için, KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki birimlerin aktif ve reaktif güç üretimleri Çizelge 5.3'de verilmiştir. Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere 6 nolu baraya bağlı pompayla doldurmalı hidrolik birim, yük talebinin düşük olduğu 1, 5 ve 6. alt zaman dilimlerinde üst rezervuara su pompalarken, yük talebinin yüksek olduğu 2, 3 ve 4. alt zaman dilimlerinde ise enerji üretmektedir. Ayrıca Çizelge 5.3'den çözüm noktasında, 9 ve 11 nolu baralara bağlı pahalı birimlerin aktif güç üretmediği ve sadece senkron kompensatör olarak çalıştığı görülmektedir. Bunun yanında bütün üretim birimlerinin, sahip oldukları alt - üst üretim sınırları arasında üretim yaptıkları görülmektedir.

Çizelge 5.3. $w=1,0$ ve $\eta=0,75$ için KDHTKP'nin optimal çözüm noktasında birimlerin pu aktif ve reakti güç üretimleri.

	Alt zaman dilimi (j)					
	1	2	3	4	5	6
$P_{G1,j}$	1,628428	2,574291	2,666064	2,574291	1,669808	1,628428
$Q_{G1,j}$	0,212710	0,473532	0,669070	0,473532	0,222315	0,212710
$P_{G4,j}$	0,832669	1,653692	1,794642	1,653692	0,874364	0,832669
$Q_{G4,j}$	0,273487	0,907266	1,198632	0,907266	0,394286	0,273487
$P_{G6,j}$	-1,213482	0,391212	1,300000	0,391212	-0,349993	-1,213482
$Q_{G6,j}$	-	-	-	-	-	-
$P_{G7,j}$	0,827289	1,699895	1,699929	1,699895	0,895483	0,827289
$Q_{G7,j}$	0,522729	1,999779	2,000000	1,999779	0,840478	0,522729
$P_{G9,j}$	-	-	-	-	-	-
$Q_{G9,j}$	0,218505	0,842992	1,051860	0,842992	0,352586	0,218505
$P_{G11,j}$	-	-	-	-	-	-
$Q_{G11,j}$	0,176497	0,925136	1,451569	0,925136	0,422236	0,176497
$P_{KAYIP,j}$	0,074978	0,319127	0,460744	0,319127	0,089755	0,074978
$P_{YÜK,j}$	2,00	6,00	7,00	6,00	3,00	2,00

$w=1,0$ ve $\eta=0,75$ değerleri için, KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki bara gerilim genlikleri ve faz açıları, sırasıyla, Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'de verilmektedir.

Çizelge 5.4. $w=1,0$ ve $\eta=0,75$ için KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki pu bara gerilim genlikleri.

Bara no (i)	$U_{i,1}$	$U_{i,2}$	$U_{i,3}$	$U_{i,4}$	$U_{i,5}$	$U_{i,6}$
1	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000
2	1,02887	0,98769	0,96766	0,98769	1,01379	1,02887
3	1,00797	0,95325	0,93907	0,95325	0,99594	1,00797
4	1,05192	1,07000	1,07000	1,07000	1,05081	1,05192
5	1,01282	0,96622	0,97241	0,96622	1,02005	1,01282
6	1,01489	1,03253	1,03254	1,03253	1,02647	1,01489
7	1,04375	1,05529	1,04119	1,05529	1,04091	1,04375
8	1,01476	0,98989	0,97148	0,98989	1,00992	1,01476
9	1,03073	1,02990	1,03070	1,02990	1,02492	1,03073
10	1,02202	0,99905	0,95414	0,99905	0,99924	1,02202
11	1,03392	1,04228	1,04726	1,04228	1,02874	1,03392
12	1,01325	0,94300	0,93412	0,94300	0,97931	1,01325

Çizelge 5.5. $w=1,0$ ve $\eta=0,75$ için KDHTKP'nin optimal çözüm noktasında bara faz açıları (*rad* olarak).

Bara no (<i>i</i>)	$\delta_{i,1}$	$\delta_{i,2}$	$\delta_{i,3}$	$\delta_{i,4}$	$\delta_{i,5}$	$\delta_{i,6}$
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	-0,03073	-0,09402	-0,11788	-0,09402	-0,05215	-0,03073
3	-0,05018	-0,13797	-0,16683	-0,13797	-0,07469	-0,05018
4	-0,00954	-0,05236	-0,07399	-0,05236	-0,03039	-0,00954
5	-0,05416	-0,09619	-0,08955	-0,09619	-0,04951	-0,05416
6	-0,09525	-0,05359	-0,01984	-0,05359	-0,06164	-0,09525
7	-0,04073	-0,09401	-0,11185	-0,09401	-0,05691	-0,04073
8	-0,07533	-0,19175	-0,23818	-0,19175	-0,10372	-0,07533
9	-0,07874	-0,21921	-0,26874	-0,21921	-0,11660	-0,07874
10	-0,07479	-0,14669	-0,18674	-0,14669	-0,09945	-0,07479
11	-0,07450	-0,19034	-0,23927	-0,19034	-0,11023	-0,07450
12	-0,08787	-0,25409	-0,30599	-0,25409	-0,13969	-0,08787

Çizelge 5.4 ve 5.5'e göre çözüm noktasında referans baranın gerilim genliği ile faz açısı, sırasıyla, 1,05 pu ve 0 rad değerlerinde sabit tutulmuş, diğer tüm baralar için bara gerilim genlikleri ve faz açıları belirlenmiş ve bu değerlerin kabul edilen sınırlar içinde olduğu görülmüştür. $w=1,0$ ve $\eta=0,75$ değerleri için, KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki iletim hatlarında taşınan aktif güç değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Çizelge 5.6'dan görüldüğü üzere iletim hatlarından taşınan aktif güç değerleri hatların taşıma kapasitelerinin üzerine çıkmamaktadır.

Çizelge 5.6. $w=1,0$ ve $\eta=0,75$ için, KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki iletim hatlarında taşınan pu aktif güç değerleri.

Hat no (<i>l</i>)	Baradan (<i>i</i>)	Baraya (<i>k</i>)	$P_{l,1}$	$P_{l,2}$	$P_{l,3}$	$P_{l,4}$	$P_{l,5}$	$P_{l,6}$	P_l^{enb}
1	1	2	0,2027	0,6012	0,7521	0,6012	0,3418	0,2027	0,81
2	1	3	0,2454	0,6285	0,7452	0,6285	0,3524	0,2454	0,75
3	1	5	0,3181	0,5797	0,5410	0,5797	0,2849	0,3181	0,75
4	1	6	0,6915	0,3882	0,1661	0,3882	0,4518	0,6915	0,75
5	1	7	0,1705	0,3766	0,4614	0,3766	0,2387	0,1705	0,60
6	2	3	0,1204	0,2357	0,2430	0,2357	0,1286	0,1204	0,40
7	2	4	-0,1387	-0,3213	-0,3551	-0,3213	-0,1613	-0,1387	0,50
8	2	7	0,0183	-0,1376	0,1748	-0,1376	-0,0333	0,0183	0,50
9	3	4	-0,2067	-0,4413	-0,4757	-0,4413	-0,2304	-0,2067	0,75
10	3	9	0,0664	0,1691	0,2143	0,1691	0,1003	0,0664	0,35
11	4	7	0,2293	0,3155	0,2852	0,3155	0,1947	0,2293	0,50
12	4	8	0,2519	0,5374	0,6290	0,5374	0,2790	0,2519	0,75

Çizelge 5.6.(devam) $w = 1,0$ ve $\eta = 0,75$ için, KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki iletim hatlarında taşınan pu aktif güç değerleri.

Hat no (l)	Baradan (i)	Baraya (k)	$P_{l,1}$	$P_{l,2}$	$P_{l,3}$	$P_{l,4}$	$P_{l,5}$	$P_{l,6}$	P_l^{emb}
13	5	6	0,1254	-0,1906	-0,2658	-0,1906	0,0316	0,1254	0,40
14	5	7	-0,1150	-0,1579	-0,0175	-0,1579	-0,0027	-0,1150	0,40
15	6	7	-0,3348	0,1824	0,4866	0,1824	-0,0499	-0,3348	0,60
16	6	10	-0,0851	0,3932	0,7037	0,3932	0,1739	-0,0851	0,75
17	7	8	0,1688	0,4557	0,5560	0,4557	0,2172	0,1688	0,75
18	7	10	0,2204	0,3788	0,5273	0,3788	0,2949	0,2204	0,75
19	7	11	0,1448	0,4056	0,5056	0,4056	0,2235	0,1448	0,60
20	8	9	-0,0091	0,0746	0,0578	0,0746	0,0415	-0,0091	0,50
21	8	11	-0,0188	-0,0475	-0,0576	-0,0475	0,0053	-0,0188	0,50
22	8	12	0,0402	0,2226	0,2228	0,2226	0,1382	0,0402	0,75
23	9	12	0,0555	0,2274	0,2464	0,2274	0,1386	0,0555	0,75
24	10	11	-0,0181	0,1503	0,1202	0,1503	0,0103	-0,0181	0,50
25	11	12	0,1058	0,4888	0,5272	0,4888	0,2338	0,1058	0,75

KDHKP'ne ait tüm pareto optimal sonuçlar için toplam yakıt maliyeti, toplam emisyon maliyeti ve optimal sözde su fiyatı değerleri, sırasıyla Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. KDHKP'ne ait tüm pareto optimal sonuçlar için toplam yakıt maliyeti, toplam emisyon maliyeti ve optimal sözde su fiyatı değerleri.

		Ağırlık faktörü (w)				
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4
$\eta = 0,60$	Toplam yakıt maliyeti (R)	14767,55	14762,11	14756,47	14747,52	14742,87
	Toplam emisyon maliyeti (R)	2289,19	2288,67	2287,91	2292,77	2294,94
	ψ_w^{opt} (R/Acre-ft)	1,954793	1,952352	1,948699	1,954562	1,947260
$\eta = 0,67$	Toplam yakıt maliyeti (R)	14632,19	14624,03	14607,11	14597,28	14591,91
	Toplam emisyon maliyeti (R)	2250,75	2246,15	2252,54	2262,27	2254,08
	ψ_w^{opt} (R/Acre-ft)	1,935971	1,929940	1,932355	1,934774	1,931153
$\eta = 0,75$	Toplam yakıt maliyeti (R)	14431,95	14424,15	14418,04	14412,38	14407,77
	Toplam emisyon maliyeti (R)	2205,82	2203,03	2202,46	2210,56	2213,70
	ψ_w^{opt} (R/Acre-ft)	1,922046	1,914865	1,920868	1,923272	1,916087

Çizelge 5.7. (devam) KDHKP'ne ait tüm pareto optimal sonuçlar için toplam yakıt maliyeti, toplam emisyon maliyeti ve optimal sözde su fiyatı değerleri.

		Ağırlık faktörü (w)					
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\eta = 0,60$	Toplam yakıt maliyeti (R)	14739,54	14736,34	14733,53	14732,53	14731,58	14730,44
	Toplam emisyon maliyeti (R)	2300,02	2303,30	2309,30	2308,65	2307,99	2314,85
	ψ_w^{opt} (R/Acre-ft)	1,949697	1,950917	1,953358	1,950920	1,953361	1,95703
$\eta = 0,67$	Toplam yakıt maliyeti (R)	14586,36	14585,51	14579,78	14577,36	14577,51	14575,80
	Toplam emisyon maliyeti (R)	2260,45	2254,45	2254,34	2268,70	2271,21	2273,62
	ψ_w^{opt} (R/Acre-ft)	1,928742	1,932365	1,934784	1,938418	1,931176	1,93359
$\eta = 0,75$	Toplam yakıt maliyeti (R)	14404,37	14401,79	14396,91	14395,58	14394,83	14394,47
	Toplam emisyon maliyeti (R)	2212,56	2217,06	2225,56	2223,93	2226,39	2233,56
	ψ_w^{opt} (R/Acre-ft)	1,914890	1,912499	1,918495	1,924509	1,917319	1,910155

Seçilen amaçların birbiri ile zıt olduğu Çizelge 5.7'den de açıkça görülmektedir. Seçilen herbir verim değeri için $w=1$ seçildiğinde toplam yakıt maliyeti enküçüklenmiş ve elde edilen çözüm noktasında toplam emisyon maliyeti enbüyük değerinde bulunmuştur. Benzer olarak $w=0$ seçildiğinde toplam emisyon maliyeti enküçüklenmiş ve elde edilen çözüm noktasında toplam yakıt maliyeti enbüyük değerinde bulunmuştur. Ayrıca pompayla doldurmalı hidrolik birimin verimi arttıkça sistemin toplam yakıt maliyetinin azaldığı gözlemlenmiştir.

5.2. Sözde Su Fiyatı Yöntemi Kullanılarak Birden Fazla Hidrolik Birim İçeren Bir Güç Sisteminde KDHKP'nin Çözümü

Sözde su fiyatı kullanarak, birden fazla hidrolik birim içeren bir güç sisteminde KDHKP'nin çözümü için 5 adet termik ve 4 adet hidrolik birim içeren 16 baralı bir test

sistemi kullanılmıştır (Fadıl ve Yaşar, 2001). Termik birimler 1, 4, 5, 8 ve 15 nolu baralara bağlıken hidrolik birimler 10, 12, 14 ve 16 nolu baralara bağlanmıştır. 24 saatlik işletim süresi, her biri 4 saatlik, 6 adet alt zaman dilimine bölünmüştür. Termik birimlerin saat başına yakıt maliyetleri için konveks olmayan fonksiyonlar seçilerek valf-nokta etkisi modele dahil edilmiştir. Sistemdeki hidrolik birimler sabit su düşülü hidrolik birimler (*fixed head hydraulic units*) olarak modellenmiştir. Ayrıca hidrolik birimlerin birbirlerinden hidrolik olarak bağımsız oldukları varsayılmıştır. Sistemde 1 nolu bara referans bara 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 üst sınırları, sırasıyla, 0,90 *pu* ve 1,10 *pu* seçilmiştir. Test sisteminin tek hat diagramı Şekil B.1’de, hat parametreleri Çizelge B.1’de, test sisteminin yük dağılım çizelgesi Çizelge B.2’de, termik birimlerin saat başına yakıt maliyet fonksiyonu sabitleri Çizelge B.3’de, hidrolik birimlerin saat başına su salım fonksiyonları sabitleri Çizelge B.4’de, hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait veriler Çizelge B.5’de ve iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri Çizelge B.6’da verilmiştir.

F-MSG algoritmasında kullanılacak parametreler $\alpha = 1500$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_1 = 1 \times 10^{-5}$, $\varepsilon_2 = 0,05$, $\Delta_1 = 100 R/h$ ve $M = 250$ olarak alınmıştır. İkili değişkenlerin başlangıç değerleri ise $c_1^1 = 1500$ ve $\mathbf{u}_1^1 = [0, 0, \dots, 0, 0]_{(1 \times 103)}$ seçilmiştir. F-MSG algoritmasının 4. Adımında iterasyon sayısının sınırlandırılmasında kullanılan $\ell(k)$ fonksiyonu ise $\ell(k) = k$ olarak tanımlanmıştır.

KDHKP’nin çözümü için önerilen yöntem seçilen test sistemine uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8’de verilmiştir. Başlangıçta bütün hidrolik birimler için sözde su fiyatı değerleri (ψ_i^1 ’ler) 1 olarak seçilmiş ve F-MSG algoritması kullanılarak her bir alt zaman dilimindeki optimal güç akış problemleri teker teker çözülmüştür. Elde edilen çözüm noktasında her bir hidrolik birimin harcadığı su miktarı $q_{harcanan,i}$ ve $hata_i$ değerleri hesaplanmıştır. Birinci iterasyon sonunda bütün hidrolik birimler için $hata_i > 0$ olduğundan tüm ψ_i^1 değerleri, $\psi_i^2 = 2 \times \psi_i^1$ şeklinde arttırılarak ikinci iterasyona geçilmiştir. İkinci iterasyonda tekrar F-MSG algoritması ile her bir alt zaman dilimindeki optimal güç akış problemleri birer birer çözülmüştür. Elde edilen çözüm noktasında bütün

hidrolik birimler için $hata_i < 0$ olduğu için tüm ψ_i değerleri azaltılmıştır. Bütün hidrolik birimler için birinci ve ikinci iterasyonlar sonunda pozitif ve negatif birer hata değeri bulunduğundan ψ_i^3 değerleri ψ_i^1 ve ψ_i^2 değerleri arasında ikiye ayırma (bisection) metodu kullanılarak, $\psi_i^3 = 0,5 \times (\psi_i^1 + \psi_i^2)$ şeklinde, hesaplanmıştır ve tekrar her bir alt zaman diliminde F-MSG ile optimal güç akış problemi çözülmüştür. Daha sonrasında herbir iterasyonda elde edilen $hata_i$ değerine bağlı olarak sözde su fiyatı değerleri yukarıda anlatıldığı şekilde güncellenmiş ve iterasyonlar devam ettirilmiştir.

Çizelge 5.8. Herbir iterasyonda sözde su fiyatı değerindeki değişime karşılık elde edilen $q_{harcanan,i}$ (acre-ft) ve $hata_i$ (acre-ft) değerleri

	İterasyon no (iter)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ψ_{10}^{iter}	1,0000	2,0000	1,5000	1,7500	1,6250	1,6875	1,7187	1,7343
$q_{harcanan,10}$	22216,4	13097,0	22233,5	13664,4	20876,8	21115,3	18173,4	18690,4
$hata_{10}$	4616,4	-4503,0	4633,5	-3935,6	3276,8	3515,3	573,4	1090,4
ψ_{12}^{iter}	1,0000	2,0000	1,5000	1,2500	1,3750	1,4375	1,4062	1,4218
$q_{harcanan,12}$	23777,8	7680,0	8639,3	29938,8	17742,5	15131,2	17332,9	15106,2
$hata_{12}$	7377,8	-8720,0	-7760,7	13538,8	1342,5	-1268,8	932,9	-1293,8
ψ_{14}^{iter}	1,0000	2,0000	1,5000	1,7500	1,6250	1,6875	1,7187	1,7031
$q_{harcanan,14}$	25485,8	11723,2	23206,5	12594,0	18320,4	17552,9	14692,7	15338,8
$hata_{14}$	8685,8	-5076,8	6406,5	-4206,0	1520,4	752,9	-2107,3	-1461,2
ψ_{16}^{iter}	1,0000	2,0000	1,5000	1,2500	1,3750	1,3125	1,3437	1,3593
$q_{harcanan,16}$	23574,8	8444,6	18403,3	23846,8	20078,6	23638,5	22775,2	22121,2
$hata_{16}$	2774,8	-12355,4	-2396,7	3046,8	-721,4	2838,5	1975,2	1321,2

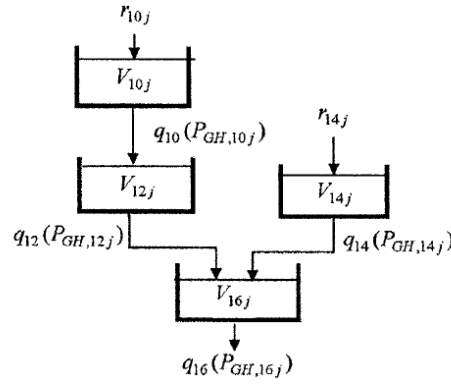
Çizelge 5.8'de görüldüğü üzere, 12 no'lu baraya bağlı hidrolik birim için 4. iterasyonda kullanılacak ψ_{12}^4 1,25 olarak hesaplanmıştır. Bu değer hesaplanırken ikiye ayırma yönteminde ψ_{12}^1 ve ψ_{12}^3 değerleri kullanılmıştır. Bu durumda 4. iterasyon sonucu elde edilen $q_{harcanan,12}$ değeri, 1. ve 3. iterasyonlarda elde edilen $q_{harcanan,12}$ değerleri arasında olmalıdır. Ancak 4. iterasyonda bu durum sağlanmamaktadır. İlerleyen iterasyonlarda benzer problemler diğer hidrolik birimler için de gözlemlenmektedir. Bu

problemden dolayı 8. iterasyon tamamlanmasına rağmen bütün hidrolik birimlere ait su harcama kısıtlarının sağlandığı bir çözüme ulaşılamamıştır.

Denklem (4.1)'de verilen güncellenmiş amaç fonksiyonu, bütün hidrolik birimler için hesaplanan *hata* değerleri toplanarak toplam yakıt maliyeti fonksiyonuna eklenmesiyle elde edilmektedir. Amaç fonksiyonunun formülasyonundan dolayı *hidrolik birimlerin harcadığı su miktarlarında* meydana gelen değişimler birbirini etkilemektedir. Ayrıca sistemdeki hidrolik birimler her ne kadar birbirlerinden hidrolik olarak bağımsız olsalar da sistemdeki güç üretim – tüketim dengesinden dolayı elektriksel olarak birbirleri ile ilişkilidirler ve güç üretimlerindeki değişimler bu dengeden dolayı birbirini etkilemektedir. Bu nedenle Çizelge 5.8'de uygulandığı gibi bütün hidrolik birimlerin ψ_i katsayıları her iterasyonda aynı anda güncellendiğinden ve dolayısıyla güç üretim değerleri aynı anda değiştirildiğinden optimal bir çözüm elde edilememiştir.

5.3. Yaklaşık Model Ve Tam Model Birarada Kullanılarak KDHKP'nin Çözümü

Yaklaşık model ve tam model birarada kullanılarak KDHKP'nin çözümü için 5 adet termik ve 4 adet hidrolik birim içeren 16 baralı bir test sistemi kullanılmıştır (Fadıl ve Yaşar, 2001). Termik birimler 1, 4, 5, 8 ve 15 nolu baralara bağlıken hidrolik birimler 10, 12, 14 ve 16 nolu baralara bağlanmıştır. 24 saatlik işletim süresi, her biri 4 saatlik, 6 adet alt zaman dilimine bölünmüştür. Termik birimlerin saat başına yakıt maliyetleri hesaplanırken ikinci dereceden polinomlar kullanılmış, valf-nokta etkisi modele dahil edilmemiştir. Sistemdeki hidrolik birimler sabit su düşülü hidrolik birimler (*fixed head hydraulic units*) olarak modellenmiştir. Gözönüne alınan bu birimlerin birbirleriyle şekil 5.1'de gösterildiği gibi hidrolik olarak bağlantılı olduğu varsayılmıştır.



Şekil 5.1. Hidrolik birimlerin birbirleri ile bağlantıları

Sistemde 1 nolu bara referans bara 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 ve üst sınırları, sırasıyla, $0,90 pu$ ve $1,10 pu$ seçilmiştir. Test sisteminin tek hat diagramı Şekil B.1’de, hat parametreleri Çizelge B.1’de, test sisteminin yük dağılım çizelgesi Çizelge B.2’de, termik birimlerin saat başına yakıt maliyet fonksiyonu sabitleri Çizelge B.3’de, hidrolik birimlerin saat başına su salım fonksiyonları sabitleri Çizelge B.4’de, hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait veriler Çizelge B.5’de ve iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri Çizelge B.6’da verilmiştir.

F-MSG algoritmasında kullanılacak parametreler $\alpha = 1500$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_1 = 1 \times 10^{-5}$, $\varepsilon_2 = 0,05$, $\Delta_1 = 100 R/h$ ve $M = 250$ olarak alınmıştır. İkili değişkenlerin başlangıç değerleri ise 1. Adım ve 3. Adım için $c_1^1 = 1500$ ve $\mathbf{u}_1^1 = [0,0,\dots,0,0]_{(1 \times 87)}$, 2. Adım içinse $c_1^1 = 1500$ ve $\mathbf{u}_1^1 = [0,0,\dots,0,0]_{(1 \times 218)}$ olarak seçilmiştir. F-MSG algoritmasının 4. Adımında iterasyon sayısının sınırlandırılmasında kullanılan $\ell(k)$ fonksiyonu ise $\ell(k) = k$ olarak tanımlanmıştır.

Ele alınan güç sisteminde KDHKP’nin çözümü için, problemin yaklaşık modelinin ve tam modelinin bir arada kullanıldığı yöntem uygulanmıştır. 1. Adımda hidrolik kısıtlar göz önünde bulundurulmadan, F-MSG algoritması ile her bir alt zaman dilimine ait OPF problemi teker teker çözülmüş ve optimal yakıt maliyeti $128386,0623 R$ olarak bulunmuştur. Elde edilen başlangıç çözüm noktasında, birimlerin aktif güç üretim değerleri ile hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları, sırasıyla, Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10’da verilmiştir. Çizelge 5.10’dan görüldüğü üzere 1. Adımda elde edilen çözüm noktasında

hidrolik kısıtlar sağlanmamaktadır. O halde elde edilen çözüm KDHKP' için uygun (*feasible*) bir çözüm değildir.

Çizelge 5.9. *iter = 0* için 1. Adımda elde edilen *pu* aktif güç üretimleri

	Alt zaman dilimi (<i>j</i>)					
	1	2	3	4	5	6
$P_{G1,j}$	1,685776	2,486516	2,448890	2,117506	2,604346	2,203775
$P_{G4,j}$	0,450143	0,450005	0,452067	0,858212	0,540687	0,450006
$P_{G5,j}$	0,581967	0,629304	0,851046	0,991718	1,056544	0,484956
$P_{G8,j}$	0,499984	0,500007	0,500010	0,890342	0,500000	0,689882
$P_{G15,j}$	0,450024	0,449998	0,450002	0,450028	0,450000	0,450000
$P_{G10,j}$	1,185873	1,350000	1,349997	1,344668	1,349999	0,984820
$P_{G12,j}$	0,498991	0,798460	0,947171	0,923046	0,861131	0,861068
$P_{G14,j}$	0,541968	0,693870	0,798837	0,808780	0,857972	0,645562
$P_{G16,j}$	1,047205	1,153930	1,227763	1,289538	1,220636	1,006996
$P_{KAYIP,j}$	0,141948	0,212086	0,275805	0,273838	0,291290	0,177067
$P_{YÜK,j}$	6,800000	8,300000	8,750000	9,400000	9,150000	7,600000

Çizelge 5.10. *iter = 0* için 1. Adım sonunda hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları (*acre-ft* olarak).

Bağlı olduğu bara (<i>i</i>)	$q_{harcanan,i}$	$q_{TOPLAM,i}$
10	24072,2144	17600,0000
12	19806,8702	16000,0000
14	18944,1952	16800,0000
16	24046,4069	22200,0000

2. Adımda, hidrolik kısıtların sağlandığı bir aktif güç üretim dağıtımı elde etmek için 1. Adımda elde edilen yakıt maliyeti ve $P_{KAYIP,j}$ değerleri ile 2. Adımda verilen alt problem çözülmüştür. Elde edilen çözüm noktasında birimlerin aktif güç üretim değerleri ile hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları, sırasıyla, Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12'de verilmiştir. Çizelge 5.12'de görüldüğü üzere 2. Adımda elde edilen çözümde hidrolik kısıtlar sağlanmaktadır. Ancak 2. Adımda kullanılan alt problem reaktif güç üretim-tüketim dengesini, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasitelerini ve bara gerilimleri genlik kısıtlarını içermediğinden, elde edilen bu çözüm yaklaşık bir çözümdür.

Çizelge 5.11. $iter = 1$ için 2. Adımda elde edilen pu aktif güç üretimleri

	Alt zaman dilimi (j)					
	1	2	3	4	5	6
$P_{G1,j}$	2,519913	2,519912	2,519908	2,519916	2,519912	2,519917
$P_{G4,j}$	1,003377	1,003378	1,003367	1,003372	1,003378	1,003372
$P_{G5,j}$	0,988284	0,988286	0,988284	0,988290	0,988277	0,988283
$P_{G8,j}$	0,621720	0,621728	0,621722	0,621731	0,621723	0,621699
$P_{G15,j}$	0,450000	0,450000	0,450000	0,450000	0,450000	0,450000
$P_{G10,j}$	0,285656	0,818284	0,953291	0,750586	0,977526	1,083871
$P_{G12,j}$	0,000245	0,620189	0,467779	1,129234	1,038934	0,098457
$P_{G14,j}$	0,138600	0,378102	1,045974	1,037677	0,707801	0,090076
$P_{G16,j}$	0,934152	1,112206	0,975479	1,173032	1,133738	0,921392
$P_{KAYIP,j}$	0,141948	0,212086	0,275805	0,273838	0,291290	0,177067
$P_{YÜK,j}$	6,800000	8,300000	8,750000	9,400000	9,150000	7,600000

Çizelge 5.12. $iter = 1$ için 2. Adım sonundaki hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları ($acre-ft$ olarak).

Bağlı olduğu bara (i)	$q_{harcanan,i}$	$q_{TOPLAM,i}$
10	17600,0000	17600,0000
12	16000,0000	16000,0000
14	16800,0000	16800,0000
16	22200,0000	22200,0000

3. Adımda ise, tüm elektrik ve hidrolik kısıtların sağlandığı tam bir çözüm elde etmek için, hidrolik birimlerin aktif güç üretimlerini Çizelge 5.11’de verilen değerlerde sabit tutarak, F-MSG algoritması ile tüm alt zaman dilimlerindeki OPF problemleri birer birer çözülmüştür. 3. Adımdaki çözüm noktasında birimlerin aktif güç üretim değerleri ile hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları, sırasıyla, Çizelge 5.13 ve Çizelge 5.14’de verilmiştir. $iter = 1$ için, 2. Adım ve 3. Adım’ın gerçekleştirilmesi ile çözüm işleminin birinci iterasyonu tamamlanmıştır. Birinci iterasyon sonunda elde edilen yakıt maliyeti, Çizelge 5.13’de verilen aktif güç üretim değerleri ile 147295,2922 R olarak hesaplanmıştır. Daha sonra bölüm 4.3.2’de anlatıldığı şekilde iterasyonlara devam edilmiştir.

Çizelge 5.13. $iter = 1$ için 3. Adımda elde edilen pu aktif güç üretimleri

	Alt zaman dilimi (j)					
	1	2	3	4	5	6
$P_{G1,j}$	1,889411	1,980810	2,158143	2,004075	2,176752	1,963590
$P_{G4,j}$	1,196938	1,014713	0,897571	0,906408	0,873718	1,107231
$P_{G5,j}$	1,073612	0,079790	1,181350	1,280159	1,231788	1,053524
$P_{G8,j}$	0,819835	0,888583	0,865164	0,924253	0,817199	0,891878
$P_{G15,j}$	0,603620	0,587098	0,449993	0,450000	0,450009	0,554937
$P_{G10,j}$	0,285656	0,818284	0,953291	0,750586	0,977526	1,083871
$P_{G12,j}$	0,000245	0,620189	0,467779	1,129234	1,038934	0,098457
$P_{G14,j}$	0,138600	0,378102	1,045974	1,037677	0,707801	0,090076
$P_{G16,j}$	0,934152	1,112206	0,975479	1,173032	1,133738	0,921392
$P_{KAYIP,j}$	0,142050	0,179775	0,244780	0,255424	0,257484	0,164957
$P_{YÜK,j}$	6,800000	8,300000	8,750000	9,400000	9,150000	7,600000

Çizelge 5.14. $iter = 1$ için 3. Adım sonundaki hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları (*acre-ft* olarak).

Bağlı olduğu bara (i)	$q_{harcanan,i}$	$q_{TOPLAM,i}$
10	17600,0000	17600,0000
12	16000,0000	16000,0000
14	16800,0000	16800,0000
16	22200,0000	22200,0000

Her iterasyon sonunda elde edilen yakıt maliyetleri Çizelge 5.15’de gösterildiği gibi bulunmuştur. Çizelge 5.15’de görüldüğü üzere 4. iterasyon sonunda $azalma > 0$ olduğundan çözüme devam edilmemiş, 3. iterasyonda elde edilen 147191,1110 R’lık yakıt maliyeti KDHTKP’nin optimal yakıt maliyeti olarak alınmıştır.

Çizelge 5.15. Herbir iterasyon sonunda elde edilen yakıt maliyetleri

İterasyon no (iter)	Yakıt maliyeti (R)
0	128386,0623
1	147295,2922
2	147284,3710
3	147191,1110
4	147250,7857

KDHTKP'ne ait optimal çözüm noktasında birimlerin aktif/reaktif güç üretim değerleri Çizelge 5.16'da verilmiştir. Çizelge 5.16'da görüldüğü üzere bütün üretim birimleri, sahip oldukları alt - üst üretim sınırları arasında üretim yapmaktadırlar.

Çizelge 5.16. KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki pu aktif ve reaktif güç üretimleri.

	<i>Alt zaman dilimi (j)</i>					
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
$P_{G1,j}$	1,886465	1,980780	2,066457	2,039882	2,122740	1,965348
$Q_{G1,j}$	-0,066482	0,336737	0,284034	0,206447	0,447126	0,323590
$P_{G4,j}$	1,183615	1,018413	0,929053	0,917440	0,924240	1,078954
$Q_{G4,j}$	0,833995	0,582196	0,598903	0,678664	0,630383	0,555360
$P_{G5,j}$	1,080837	1,084310	1,218296	1,222203	1,236049	1,101783
$Q_{G5,j}$	1,012254	0,993148	1,514044	1,539886	1,518543	1,026379
$P_{G8,j}$	0,824103	0,875555	0,887305	0,882782	0,827093	0,868864
$Q_{G8,j}$	0,646330	0,839288	0,977995	1,032373	0,981577	0,787670
$P_{G15,j}$	0,580817	0,604163	0,457395	0,491276	0,450003	0,533877
$Q_{G15,j}$	0,612226	1,020997	0,792676	1,095750	0,699042	0,640668
$P_{G10,j}$	0,349559	0,934824	1,143367	0,962203	0,694707	0,784555
$Q_{G10,j}$	0,371783	0,364980	0,571981	0,605555	0,533445	0,467392
$P_{G12,j}$	0,035938	0,449705	0,611703	0,995056	0,999316	0,263122
$Q_{G12,j}$	0,071608	0,146272	0,199455	0,232324	0,226456	0,113703
$P_{G14,j}$	0,027812	0,526552	0,635098	0,937582	0,972676	0,298509
$Q_{G14,j}$	0,106915	0,409149	0,256835	0,368414	0,467862	0,330513
$P_{G16,j}$	0,974299	1,002027	1,035403	1,199202	1,178625	0,860444
$Q_{G16,j}$	0,256307	0,353574	0,397931	0,427816	0,527992	0,297140
$P_{KAYIP,j}$	0,143448	0,176329	0,234085	0,247664	0,255458	0,155457

KDHTKP'nin optimal çözüm noktasına ait bara gerilim genlikleri ve faz açıları, sırasıyla, Çizelge 5.17 ve Çizelge 5.18'de verilmektedir. Bu çizelgelere göre çözüm noktasında referans baranın gerilim genliği ile faz açısı, sırasıyla, 1,05 pu ve 0 rad değerlerinde sabit tutulmuş, diğer tüm baralar için bara gerilim genlikleri belirlenmiş sınırlar içinde bulunmuştur.

Çizelge 5.17. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasındaki pu bara gerilim genlikleri.

Bara no (i)	$U_{i,1}$	$U_{i,2}$	$U_{i,3}$	$U_{i,4}$	$U_{i,5}$	$U_{i,6}$
1	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000
2	1,00815	0,98875	0,96653	0,97548	0,95977	0,99110
3	1,01610	0,99574	0,99988	1,00805	0,98692	1,00260
4	1,10000	1,07081	1,09030	1,09635	1,08161	1,06766
5	1,07229	1,05817	1,06975	1,07404	1,06430	1,05646
6	1,02937	1,02080	1,02004	1,01785	1,01745	1,01283
7	1,03771	1,01302	1,02688	1,02464	1,02179	1,01487
8	1,07224	1,06308	1,07748	1,08004	1,07380	1,05896
9	1,03820	1,03491	1,03586	1,03912	1,02810	1,02044
10	1,07864	1,06805	1,09432	1,09732	1,08142	1,06226
11	1,05764	1,02171	1,06251	1,05961	1,05002	1,02000
12	1,06105	1,05400	1,07940	1,08759	1,07812	1,04638
13	1,02977	1,00898	1,02268	1,02944	1,02431	1,01220
14	1,06736	1,06434	1,09158	1,10000	1,09794	1,05554
15	1,05923	1,04568	1,07218	1,07346	1,06750	1,04606
16	1,08364	1,07121	1,09133	1,09766	1,10000	1,06663

Çizelge 5.18. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasındaki bara faz açıları (rad olarak).

Bara no (i)	$\delta_{i,1}$	$\delta_{i,2}$	$\delta_{i,3}$	$\delta_{i,4}$	$\delta_{i,5}$	$\delta_{i,6}$
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	-0,06967	-0,07394	-0,08794	-0,08531	-0,09037	-0,07101
3	-0,08040	-0,08177	-0,08104	-0,07814	-0,08972	-0,07611
4	-0,05174	-0,03518	-0,02994	-0,03079	-0,03209	-0,03965
5	-0,05186	-0,04656	-0,05250	-0,05200	-0,05362	-0,04762
6	-0,08312	-0,07702	-0,08267	-0,08499	-0,08084	-0,08166
7	-0,07579	-0,08279	-0,07595	-0,07705	-0,07134	-0,08308
8	-0,06370	-0,06007	-0,05749	-0,05775	-0,05357	-0,06294
9	-0,10542	-0,07803	-0,07886	-0,07847	-0,07866	-0,09222
10	-0,08626	-0,04259	-0,02516	-0,02942	-0,03539	-0,05946
11	-0,10963	-0,09519	-0,06037	-0,05804	-0,05312	-0,10590
12	-0,10667	-0,07659	-0,05226	-0,03941	-0,03018	-0,08841
13	-0,10714	-0,10562	-0,09289	-0,08629	-0,07561	-0,10509
14	-0,10974	-0,07382	-0,03339	-0,01786	-0,00426	-0,09026
15	-0,10953	-0,11032	-0,07811	-0,08320	-0,05619	-0,10034
16	-0,03367	-0,03448	-0,01981	-0,00964	0,00004	-0,04067

KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında iletim hatlarındaki aktif güç akışları Çizelge 5.19'da verilmiştir. Çizelge 5.19'dan görüldüğü üzere iletim hatlarındaki aktif güç akışları hatların taşıma kapasitelerinin üzerine çıkmamaktadır.

Çizelge 5.19. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında iletim hatlarındaki pu aktif güç akış değerleri.

Hat no (l)	Baradan (i)	Baraya (k)	$P_{l,1}$	$P_{l,2}$	$P_{l,3}$	$P_{l,4}$	$P_{l,5}$	$P_{l,6}$	P_l^{enb}
1	1	2	0,3877	0,4411	0,5396	0,5130	0,5615	0,4243	0,6250
2	1	3	0,4906	0,4989	0,4946	0,4776	0,5446	0,4659	0,6250
3	1	5	0,1634	0,1548	0,1674	0,1627	0,1752	0,1597	0,3125
4	1	6	0,4521	0,4279	0,4575	0,4712	0,4502	0,4582	0,6250
5	1	7	0,3925	0,4580	0,4071	0,4153	0,3910	0,4571	0,6250
6	3	2	-0,0359	-0,0242	0,0513	0,0524	0,0229	-0,0105	0,1875
7	5	2	0,4299	0,5245	0,7374	0,7049	0,7480	0,4732	0,7500
8	4	3	0,2598	0,3296	0,3797	0,3615	0,4119	0,2661	0,6250
9	5	3	0,2330	0,2692	0,2531	0,2371	0,2983	0,2237	0,3125
10	4	5	0,0615	0,0788	0,1506	0,1494	0,1371	0,0599	0,3125
11	4	9	0,2485	0,1805	0,2222	0,2221	0,2101	0,2212	0,3125
12	4	10	0,2201	0,0424	-0,0322	-0,0089	0,0175	0,1094	0,3125
13	4	11	0,3937	0,3871	0,2086	0,1934	0,1475	0,4222	0,4500
14	5	6	0,4213	0,3934	0,4197	0,4639	0,3800	0,4399	0,6250
15	5	9	0,2171	0,1281	0,1213	0,1234	0,1175	0,1820	0,2250
16	7	6	0,0322	-0,0257	0,0281	0,0318	0,0340	-0,0023	0,1250
17	8	6	0,1674	0,1522	0,2202	0,2387	0,2277	0,1658	0,3125
18	9	6	-0,1034	0,0190	0,0474	0,0713	0,0297	-0,0415	0,3125
19	8	7	0,2006	0,3381	0,3016	0,3207	0,2953	0,2984	0,6250
20	7	13	0,1629	0,1107	0,0862	0,0358	0,0159	0,1053	0,1750
21	16	7	0,3213	0,3680	0,4346	0,5166	0,5489	0,3231	0,7500
22	8	9	0,1756	0,0865	0,1116	0,1092	0,1272	0,1326	0,1875
23	8	13	0,2804	0,2988	0,2538	0,2141	0,1769	0,2719	0,3125
24	10	9	0,2906	0,4460	0,7111	0,6629	0,5753	0,4278	0,9375
25	12	9	0,0316	0,0384	0,2063	0,2800	0,3253	0,0604	0,6250
26	10	11	0,1715	0,3719	0,2638	0,2361	0,1575	0,3283	0,6250
27	10	12	0,1046	0,1592	0,1360	0,0541	-0,0206	0,1370	0,3125
28	12	11	0,0205	0,1486	0,0737	0,1471	0,1650	0,1302	0,2500
29	14	11	0,0187	0,3112	0,3626	0,5374	0,6452	0,2343	0,7500
30	12	13	0,0684	0,2193	0,3036	0,3388	0,3189	0,1425	0,6250
31	12	15	0,0193	0,2015	0,1631	0,2830	0,1693	0,0660	0,4375
32	15	13	0,0426	0,0448	0,1615	0,0962	0,1713	0,0827	0,3125
33	16	13	0,3623	0,3488	0,3734	0,3930	0,3941	0,3137	0,7500
34	14	15	0,0090	0,2154	0,2725	0,4001	0,3275	0,0642	0,6250
35	16	15	0,2907	0,2852	0,2274	0,2895	0,2356	0,2235	0,9375

KDHTKP'ya ait optimal çözüm noktasında hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları ile hidrolik birimlerin alt zaman dilimi sonlarında rezervuarlarındaki su miktarları, sırasıyla, Çizelge 5.20 ve Çizelge 5.21'de verilmiştir. Bu çizelgelerden görüleceği üzere, çözüm noktasında, bütün hidrolik kısıtlar sağlanmaktadır.

Çizelge 5.20. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları (*acre-ft* olarak).

Bağlı olduğu bara (i)	$q_{GHi,1}$	$q_{GHi,2}$	$q_{GHi,3}$	$q_{GHi,4}$	$q_{GHi,5}$	$q_{GHi,6}$	$q_{harcanan,i}$
10	2014,92	3178,43	3593,01	3232,86	2701,08	2879,70	17600,00
12	1369,13	2395,27	2797,02	3747,74	3758,30	1932,54	16000,00
14	1582,85	2710,01	2955,32	3638,94	3718,25	2194,63	16800,00
16	3538,32	3604,87	3684,97	4078,08	4028,70	3265,06	22200,00

Çizelge 5.21. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında hidrolik birimlerin alt zaman dilimi sonu rezervuar su miktarı (*acre-ft* olarak).

Bağlı olduğu bara (i)	$V_{i,0}$	$V_{i,1}$	$V_{i,2}$	$V_{i,3}$	$V_{i,4}$	$V_{i,5}$	$V_{i,6}$
10	50000,00	50585,08	50006,65	49013,63	48380,77	48279,70	48000,00
12	45000,00	45645,80	46428,96	47224,95	46710,07	45652,85	46600,00
14	46600,00	46817,15	45907,14	44751,81	42912,88	40994,63	40600,00
16	40000,00	39413,66	40914,07	42981,45	46290,04	49737,89	50600,00

Ele alınan KDHTKP, literatürde Pseudo Spot Elektrik Fiyatı Algoritması (Pseudo Spot Price Algorithm) ve gradyent yöntemi (Fadıl ve Yaşar, 2001) ile de çözülmüştür. Bu yöntemler ile elde edilen optimal yakıt maliyetleri Çizelge 5.22'de verilmiştir. Çizelge 5.22'de görüldüğü üzere önerilen yöntem ile daha düşük yakıt maliyetine sahip çözüm elde edilmiştir.

Çizelge 5.22. KDHTKP'ye ait optimal yakıt maliyeti değerlerinin karşılaştırılması

Pseudo spot Elektrik fiyatı algoritması	Gradyent yöntemi	F-MSG
147420,4220 (R)	147522,3350 (R)	147191,1110 (R)

5.4. Yaklaşık Model Ve Tam Model Birarada Kullanılarak Değişken Su Seviyeli Hidrolik Birimler İçeren Bir Test Sisteminde KDHKP'nin Çözümü

KDHKP'nin çözümünde yaklaşık model ile tam modelin birarada kullanıldığı çözüm algoritmasını denemek için 5 adet termik ile 4 adet hidrolik birimden oluşan 16 baralı bir test sistemi göz önüne alınmıştır (Fadıl ve Yaşar, 2001). Termik birimler 1, 4, 5, 8 ve 15 nolu baralara bağlıken hidrolik birimler 10, 12, 14 ve 16 nolu baralara bağlıdır. 24 saatlik işletim süresi, her biri 4 saatlik, 6 adet alt zaman dilimine bölünmüştür. Termik birimlerin saat başına yakıt maliyetleri için konveks olmayan fonksiyonlar seçilerek valf-nokta etkisi modele dahil edilmiştir. Sistemdeki hidrolik birimler değişken su düşülü hidrolik birimler (*variable head hydraulic units*) olarak modellenmiştir. Bu birimlerin şekil 5.1'de verildiği gibi birbirleriyle hidrolik bağlantılı olduğu varsayılmıştır.

Test sisteminin tek hat diagramı Şekil B.1'de, hat parametreleri Çizelge B.1'de, test sisteminin yük dağılım çizelgesi Çizelge B.2'de, termik birimlerin saat başına yakıt maliyet fonksiyonu sabitleri Çizelge B.7'de, hidrolik birimlerin saat başına su salım fonksiyonları sabitleri Çizelge B.8'de, hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait veriler Çizelge B.9'da ve iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri Çizelge B.10'da verilmiştir.

Sistemde 1 nolu bara referans bara olarak seçilmiş ve bu baranın gerilim genliği ile faz açısı, sırasıyla, 1,05 pu ve 0 rad olarak alınmıştır. 5 ve 15 nolu baralar sabit gerilim genlikli baralar olarak kabul edilmiş ve gerilim genlikleri, sırasıyla, 1,03 ve 1,04 pu olarak alınmıştır. Diğer tüm baralar için bara gerilim genlik alt ve üst sınırları, sırasıyla, 0,90 pu ve 1,10 pu olarak seçilmiştir.

F-MSG algoritmasında kullanılacak parametreler $\alpha = 1500$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_1 = 1 \times 10^{-5}$, $\varepsilon_2 = 0,05$, $\Delta_1 = 100 R/h$ ve $M = 250$ olarak alınmıştır. İkili değişkenlerin başlangıç değerleri ise 1. Adım ve 3. Adım için $c_1^1 = 1500$ ve $\mathbf{u}_1^1 = [0,0,\dots,0,0]_{(1 \times 87)}$, 2. Adım içinse $c_1^1 = 1500$ ve $\mathbf{u}_1^1 = [0,0,\dots,0,0]_{(1 \times 218)}$ seçilmiştir. F-MSG algoritmasının 4. Adımında iterasyon sayısının sınırlandırılmasında kullanılan $\ell(k)$ fonksiyonu ise $\ell(k) = k$ olarak tanımlanmıştır.

Ele alınan güç sisteminde KDHKP'nin çözümü için, problemin yaklaşık modelinin ve tam modelinin bir arada kullanıldığı yöntem uygulanmıştır. 1. Adımda hidrolik kısıtlar göz önünde alınmadan, F-MSG algoritması ile her bir alt zaman dilimdeki OPF problemi teker teker çözülmüş, yakıt maliyeti 120451,9137 R olarak bulunmuştur. Elde edilen başlangıç çözüm noktasında birimlerin aktif güç üretim değerleri ile hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları, sırasıyla, Çizelge 5.23 ve Çizelge 5.24'de verilmiştir. Çizelge 5.24'de görüldüğü üzere 1. Adımda elde edilen çözüm noktasında hidrolik kısıtlar sağlanmamaktadır. O halde elde edilen çözüm KDHKP için uygun (*feasible*) bir çözüm değildir.

Çizelge 5.23. $iter = 0$ için 1. Adımda elde edilen pu aktif güç üretimleri

	Alt zaman dilimi (j)					
	1	2	3	4	5	6
$P_{G1,j}$	1,739652	2,060758	1,920108	1,965042	2,076851	1,969705
$P_{G4,j}$	0,449999	0,608820	0,705647	0,755198	0,846240	0,449987
$P_{G5,j}$	0,399987	0,400051	0,745149	0,895957	0,718809	0,400063
$P_{G8,j}$	0,499927	0,500021	0,500097	0,765736	0,499979	0,499993
$P_{G15,j}$	0,449950	0,450004	0,449987	0,449999	0,449998	0,449996
$P_{G10,j}$	1,079215	1,197956	1,092929	1,304077	1,268426	1,069170
$P_{G12,j}$	0,695021	1,103208	1,650028	1,437368	1,556953	0,985746
$P_{G14,j}$	0,542489	0,899523	0,900740	0,956616	0,936207	0,739821
$P_{G16,j}$	1,105157	1,291189	1,077506	1,161375	1,103305	1,234792
$P_{KAYIP,j}$	0,161401	0,211553	0,292166	0,291537	0,306962	0,199076
$P_{YÜK,j}$	6,800000	8,300000	8,750000	9,400000	9,150000	7,600000

Çizelge 5.24 $iter = 0$ için 1. Adım sonunda bulunan hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları (*acre-ft* olarak).

Bağlı Olduğu Bara (i)	$q_{harcanan,i}$	$q_{TOPLAM,i}$
10	25122,4257	17600,0000
12	19412,8766	16000,0000
14	20142,1951	16800,0000
16	23816,4164	22200,0000

2. Adımda, hidrolik kısıtların sağlandığı bir aktif güç dağıtımı elde etmek için 1. Adımda elde edilen yakıt maliyeti ve $P_{KAYIP,j}$ değerleri ile 2. Adımda verilen alt problem

çözümüştür. *Alt problemin çözümünde karar değişkenleri olarak termik birinlerin aktif güç üretim değerleri ile hidrolik birimlerin su salım değerleri seçilmiştir* (Bkz. Denklem 3.20). Elde edilen çözüm noktasında, birimlerin aktif güç üretimleri ile hidrolik birimlerin harcadıkları su miktarları, sırasıyla, Çizelge 5.25 ve Çizelge 5.26'da verilmiştir. Çizelge 5.26'da görüldüğü üzere 2. Adımda elde edilen çözüm noktasında hidrolik kısıtlar sağlanmaktadır. Ancak 2. Adımda kullanılan alt problem reaktif güç üretim-tüketim dengesini, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasitelerini ve bara gerilim genlik kısıtlarını içermediğinden elde edilen bu çözüm yaklaşık bir çözümdür.

Çizelge 5.25. *iter = 1 için 2. Adımda elde edilen pu aktif güç üretimleri.*

	Alt zaman dilimi (j)					
	1	2	3	4	5	6
$P_{G1,j}$	2,148600	2,695037	2,827324	2,932096	2,874127	2,516247
$P_{G4,j}$	0,590115	1,112496	1,239844	1,339896	1,284552	0,941844
$P_{G5,j}$	0,609361	1,029929	1,132128	1,212901	1,168498	0,892640
$P_{G8,j}$	0,500000	0,567238	0,651250	0,717426	0,681187	0,500000
$P_{G15,j}$	0,450000	0,450000	0,450000	0,450000	0,450000	0,450000
$P_{G10,j}$	0,780439	0,743628	0,688605	0,647429	0,585587	0,507946
$P_{G12,j}$	0,771673	0,748091	0,673985	0,621795	0,510075	0,322549
$P_{G14,j}$	0,698346	0,586302	0,476735	0,354523	0,207910	0,140906
$P_{G16,j}$	0,412867	0,578832	0,902294	1,415472	1,695025	1,526945
$P_{KAYIP,j}$	0,161401	0,211553	0,292166	0,291537	0,306962	0,199076
$P_{YÜK,j}$	6,800000	8,300000	8,750000	9,400000	9,150000	7,600000

Çizelge 5.26. *iter = 1 için 2. Adım sonunda, hidrolik birimlerin harcadıkları su miktarları (acre-ft olarak).*

Bağlı olduğu bara (i)	$q_{harcanan,i}$	$q_{TOPLAM,i}$
10	17600,0000	17600,0000
12	16000,0000	16000,0000
14	16800,0000	16800,0000
16	22200,0000	22200,0000

3. Adımda tüm kısıtların sağlandığı bir tam çözüm elde etmek için, hidrolik birimlere ait aktif güç üretimleri Çizelge 5.25'de verilen değerlerde sabit tutularak, F-MSG algoritması ile tüm alt zaman dilimindeki OPF problemleri teker teker çözülmüştür. 3.

Adımdaki çözüm noktasında, birimlerin aktif güç üretimleri ile hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları, sırasıyla, Çizelge 5.27 ve Çizelge 5.28’de verilmiştir.

Çizelge 5.27 $iter = 1$ için 3. Adımda elde edilen pu aktif güç üretimleri.

	Alt zaman dilimi (j)					
	1	2	3	4	5	6
$P_{G1,j}$	1,770622	2,131498	2,142707	2,176235	2,254362	1,830744
$P_{G4,j}$	0,599428	0,855933	1,247620	1,328970	1,467783	0,980273
$P_{G5,j}$	0,816924	1,030496	1,022130	0,884501	0,894878	0,746121
$P_{G8,j}$	0,636127	0,986084	1,175599	0,986157	0,798111	0,725000
$P_{G15,j}$	0,450204	0,814752	0,666117	1,248986	1,088143	1,004848
$P_{G10,j}$	0,780439	0,743628	0,688605	0,647429	0,585587	0,507946
$P_{G12,j}$	0,771673	0,748091	0,673985	0,621795	0,510075	0,322549
$P_{G14,j}$	0,698346	0,586302	0,476735	0,354523	0,207910	0,140906
$P_{G16,j}$	0,412867	0,578832	0,902294	1,415472	1,695025	1,526945
$P_{KAYIP,j}$	0,136670	0,175862	0,245822	0,264082	0,351874	0,185665
$P_{YÜK,j}$	6,800000	8,300000	8,750000	9,400000	9,150000	7,600000

Çizelge 5.28. $iter = 1$ için 3. Adım sonunda bulunan, hidrolik birimlere ait harcanan su miktarları (*acre-ft* olarak).

Bağlı olduğu bara (i)	$q_{harcanan,i}$	$q_{TOPLAM,i}$
10	17600,0000	17600,0000
12	16000,0000	16000,0000
14	16800,0000	16800,0000
16	22200,0000	22200,0000

$iter = 1$ için 2. ve 3. Adımlardaki hesaplamaların yapılmasıyla çözüm algoritmasına ait birinci iterasyon tamamlanmıştır. Birinci iterasyon sonunda elde edilen yakıt maliyeti, Çizelge 5.27’de verilen aktif güç üretim değerleri ile 153242,0001 R olarak hesaplanmıştır. Daha sonra bölüm 4.3.2’de anlatıldığı şekilde iterasyonlara devam edilmiştir. Her iterasyon sonunda elde edilen yakıt maliyetleri Çizelge 5.29’da verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere 4. iterasyon sonunda $azalma > 0$ olduğundan çözüme devam edilmemiş, 3. iterasyonda elde edilen 152999,2931R değeri KDHTKP’nin optimal yakıt maliyeti olarak alınmıştır.

Çizelge 5.29. Her iterasyon sonunda elde edilen yakıt maliyetleri.

İterasyon no (iter)	Yakıt maliyeti (R)
0	120451,9137
1	153242,0001
2	153007,9813
3	152999,2931
4	153225,7334

KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında birimlere ait aktif/reaktif güç üretim değerleri Çizelge 5.30'da verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere tüm üretim birimleri, sahip oldukları alt - üst üretim sınırları arasında üretim yapmaktadırlar.

Çizelge 5.30. KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki pu aktif ve reaktif güç üretimleri.

	Alt zaman dilimi (j)					
	1	2	3	4	5	6
$P_{G1,j}$	1,851505	2,153921	2,234131	2,206948	2,253051	1,939274
$Q_{G1,j}$	0,675251	0,716807	0,821660	0,764444	1,023686	0,600343
$P_{G4,j}$	0,681853	0,833904	1,276999	1,316771	1,393980	0,945585
$Q_{G4,j}$	0,241394	0,667846	0,506029	1,504998	1,927735	0,776830
$P_{G5,j}$	0,831667	1,037355	0,985875	0,876117	0,924489	0,704610
$Q_{G5,j}$	0,527169	0,484014	0,892595	0,672478	0,866954	0,508959
$P_{G8,j}$	0,677187	0,986157	1,135538	1,007862	0,811295	0,723772
$Q_{G8,j}$	0,634374	0,907140	0,931716	1,084724	1,074775	0,870858
$P_{G15,j}$	0,450000	0,844738	0,594482	1,103509	1,005516	0,941753
$Q_{G15,j}$	0,378318	1,025844	0,249951	0,863456	1,221333	0,360535
$P_{G10,j}$	0,754053	0,728365	0,708659	0,663672	0,602900	0,512819
$Q_{G10,j}$	0,438094	0,355463	0,641274	0,496541	0,212917	0,510706
$P_{G12,j}$	0,647138	0,778514	0,685486	0,669730	0,572151	0,347880
$Q_{G12,j}$	0,132848	0,194157	0,173016	0,152787	0,228743	0,194425
$P_{G14,j}$	0,662531	0,568253	0,519335	0,395896	0,209333	0,140906
$Q_{G14,j}$	0,647164	0,375209	0,706256	0,103628	-0,276391	0,241914
$P_{G16,j}$	0,380136	0,543700	0,856702	1,424354	1,685351	1,526945
$Q_{G16,j}$	0,200418	0,343654	0,787803	0,693693	0,060382	0,577658
$P_{KAYIP,j}$	0,136071	0,174949	0,247835	0,264880	0,308193	0,183746
$P_{YÜK,j}$	6,800000	8,300000	8,750000	9,400000	9,150000	7,600000

KDHTKP'nin optimal çözüm noktasında bara gerilim genlikleri ve faz açıları, sırasıyla, Çizelge 5.31 ve Çizelge 5.32'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.31. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasındaki pu bara gerilim genlikleri.

Bara no (i)	$U_{i,1}$	$U_{i,2}$	$U_{i,3}$	$U_{i,4}$	$U_{i,5}$	$U_{i,6}$
1	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000
2	0,97786	0,96918	0,93804	0,94611	0,93777	0,97362
3	0,98501	0,97997	0,97677	0,99119	0,97812	0,99094
4	1,05261	1,05585	1,06726	1,10000	1,10000	1,06338
5	1,03000	1,03000	1,03000	1,03000	1,03000	1,03000
6	1,00163	1,00510	0,99674	0,99142	0,98893	1,00245
7	1,01323	1,00312	1,01797	1,01271	0,98763	1,02196
8	1,04556	1,05508	1,06280	1,06509	1,04526	1,06266
9	1,01436	1,02018	1,01119	1,01024	0,99556	1,01230
10	1,06455	1,05358	1,07296	1,06573	1,03957	1,05513
11	1,05515	1,00862	1,05248	1,02273	0,99435	1,00901
12	1,05506	1,04905	1,05824	1,05033	1,03419	1,04497
13	1,00372	0,99842	1,00710	1,00960	0,98557	1,01930
14	1,10000	1,05229	1,10000	1,04203	0,99509	1,03777
15	1,04000	1,04000	1,04000	1,04000	1,04000	1,04000
16	1,04601	1,05378	1,09896	1,10000	1,04006	1,10000

Çizelge 5.32. KDHTKP'nin optimal çözüm noktasındaki bara faz açıları (rad olarak).

Bara no (i)	$\delta_{i,1}$	$\delta_{i,2}$	$\delta_{i,3}$	$\delta_{i,4}$	$\delta_{i,5}$	$\delta_{i,6}$
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	-0,06351	-0,07612	-0,09154	-0,09194	-0,09666	-0,07750
3	-0,07380	-0,08727	-0,08372	-0,08475	-0,09575	-0,08301
4	-0,02778	-0,04684	-0,02523	-0,03840	-0,04055	-0,04848
5	-0,04089	-0,04625	-0,05400	-0,05690	-0,05873	-0,05510
6	-0,07160	-0,07916	-0,08466	-0,08722	-0,08228	-0,07729
7	-0,07275	-0,09149	-0,07900	-0,06773	-0,05357	-0,05289
8	-0,05531	-0,06162	-0,05076	-0,04884	-0,04422	-0,04631
9	-0,06964	-0,08175	-0,08746	-0,09014	-0,08857	-0,08882
10	-0,02757	-0,05183	-0,04639	-0,05089	-0,04882	-0,06362
11	-0,04674	-0,09604	-0,07376	-0,08238	-0,08342	-0,09669
12	-0,04135	-0,06588	-0,05669	-0,05149	-0,04769	-0,06105
13	-0,08770	-0,11020	-0,09825	-0,07705	-0,05936	-0,06247
14	-0,02460	-0,06773	-0,05405	-0,05094	-0,05025	-0,07080
15	-0,06939	-0,10155	-0,07653	-0,05712	-0,03871	-0,03617
16	-0,05430	-0,06892	-0,04214	0,01564	0,07246	0,04073

Çizelge 5.31 ve Çizelge 5.32'ye göre çözüm noktasında referans baranın gerilim genliği ile faz açısı, sırasıyla, 1,05 pu ve 0 rad değerlerinde sabit tutulmuş, diğer tüm baralar ait gerilim genlikleri belirlenmiş sınırlar içinde elde edilmiştir.

KDHTKP'nin optimal çözüm noktasında iletim hatlarında taşınan aktif güç değerleri ise Çizelge 5.33'de verilmiştir. Çizelge 5.33'de görüldüğü üzere iletim hatlarından taşınan aktif güç değerleri hatların taşıma kapasitelerinin üzerine çıkmamaktadır. Üst sınıra vuran güç akış değerleri Çizelge 5.33'de koyu renkle verilmiştir.

Çizelge 5.33. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında iletim hatlarındaki pu aktif güç akış değerleri.

Hat no (l)	Baradan (i)	Baraya (k)	$P_{l,1}$	$P_{l,2}$	$P_{l,3}$	$P_{l,4}$	$P_{l,5}$	$P_{l,6}$	P_l^{enb}
1	1	2	0,4163	0,4851	0,6035	0,5913	0,6250	0,4831	0,6250
2	1	3	0,4534	0,5304	0,5101	0,5161	0,5785	0,5061	0,6250
3	1	5	0,1557	0,1739	0,2003	0,2102	0,2165	0,2041	0,3125
4	1	6	0,4170	0,4520	0,4866	0,5037	0,4811	0,4448	0,6250
5	1	7	0,4090	0,5122	0,4333	0,3853	0,3517	0,3009	0,6250
6	3	2	-0,0326	-0,0325	0,0566	0,0603	0,0336	-0,0072	0,1875
7	5	2	0,3981	0,4908	0,6717	0,6211	0,6757	0,4129	0,7500
8	4	3	0,3094	0,2920	0,4024	0,3799	0,4389	0,2625	0,6250
9	5	3	0,2218	0,2660	0,2193	0,1895	0,2504	0,1901	0,3125
10	4	5	0,1046	0,0520	0,2069	0,2382	0,2367	0,1000	0,3125
11	4	9	0,1732	0,1488	0,2602	0,2620	0,2599	0,1809	0,3125
12	4	10	-0,0206	0,0284	0,0988	0,1241	0,1457	0,0895	0,3125
13	4	11	0,1150	0,3125	0,3084	0,3125	0,3125	0,3125	0,3125
14	5	6	0,3617	0,3779	0,3694	0,3750	0,3125	0,2752	0,6250
15	5	9	0,1072	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250	0,1250
16	7	6	0,0082	-0,0392	0,0388	0,0804	0,0832	0,0952	0,1250
17	8	6	0,1478	0,1652	0,2703	0,3040	0,2681	0,2475	0,3125
18	9	6	0,0315	0,0123	0,0102	0,0170	-0,0199	-0,0417	0,3125
19	8	7	0,2429	0,4102	0,3861	0,3035	0,2087	0,1519	0,6250
20	7	13	0,0829	0,0910	0,1054	0,0474	0,0283	0,0487	0,1250
21	16	7	0,1551	0,2087	0,3557	0,6303	0,7500	0,6767	0,7500
22	8	9	0,0744	0,0981	0,1688	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875
23	8	13	0,2120	0,3125	0,3101	0,2127	0,1469	0,1367	0,3125
24	10	9	0,5412	0,3777	0,5576	0,5215	0,4850	0,3463	0,9375
25	12	9	0,2024	0,1230	0,2250	0,2495	0,2510	0,1846	0,6250
26	10	11	0,1246	0,3155	0,1918	0,2488	0,2581	0,2581	0,6250
27	10	12	0,0673	0,0635	0,0571	0,0152	-0,0003	-0,0026	0,3125
28	12	11	0,0238	0,2133	0,0885	0,1917	0,2306	0,2267	0,2500
29	14	11	0,3424	0,3781	0,3203	0,3618	0,3180	0,3187	0,7500
30	12	13	0,3068	0,2938	0,2871	0,1946	0,1482	0,0596	0,6250

Çizelge 5.33.(devam) KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında iletim hatlarındaki pu aktif güç akış değerleri.

Hat no (l)	Baradan (i)	Baraya (k)	$P_{l,1}$	$P_{l,2}$	$P_{l,3}$	$P_{l,4}$	$P_{l,5}$	$P_{l,6}$	P_l^{enb}
31	12	15	0,1810	0,2115	0,1416	0,0488	-0,0582	-0,1259	0,4375
32	15	13	0,1477	0,1133	0,1574	0,1450	0,1892	0,1579	0,3125
33	16	13	0,1693	0,2125	0,3177	0,4755	0,5686	0,5171	0,7500
34	14	15	0,3200	0,1901	0,1990	0,0340	-0,1086	-0,1778	0,6250
35	16	15	0,0556	0,1223	0,1833	0,3185	0,3667	0,3330	0,9375

KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları ile hidrolik birimlerin zaman dilimi sonu rezervuarlarındaki, su miktarları, sırasıyla, Çizelge 5.34 ve Çizelge 5.35'de verilmiştir. Bu çizelgelerden görüleceği üzere çözüm noktasında bütün hidrolik kısıtlar sağlanmaktadır.

Çizelge 5.34. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında hidrolik birimlerin harcadığı su miktarları (*acre-ft* olarak).

Bağlı olduğu bara (i)	$q_{GHi,1}$	$q_{GHi,2}$	$q_{GHi,3}$	$q_{GHi,4}$	$q_{GHi,5}$	$q_{GHi,6}$	$q_{harcanan,i}$
10	3481,99	3372,23	3299,59	3009,95	2566,96	1869,28	17600,00
12	2848,35	3959,25	3209,19	3098,40	2324,49	560,32	16000,00
14	4862,85	4173,11	3961,85	2804,18	898,01	100,00	16800,00
16	100,00	100,00	1286,72	4926,05	7787,23	8000,00	22200,00

Çizelge 5.35. KDHTKP'ye ait optimal çözüm noktasında alt zaman dilimi sonu rezervuar su miktarları (*acre-ft* olarak).

Bağlı olduğu bara (i)	$V_{i,0}$	$V_{i,1}$	$V_{i,2}$	$V_{i,3}$	$V_{i,4}$	$V_{i,5}$	$V_{i,6}$
10	20000,00	19118,01	18345,77	17646,18	17236,23	17269,28	18000,00
12	15000,00	15633,65	15046,63	15137,03	15048,58	15291,04	16600,00
14	16600,00	13537,15	11164,05	9002,19	7998,01	8900,00	10600,00
16	10000,00	17611,19	25643,55	31527,88	32504,40	27939,68	20600,00

Sistemdeki hidrolik birimler değişken düşülü hidrolik birimler olarak seçildiğinden, bu birimlerin aktif güç üretimleri hem harcadıkları su miktarına, hem de rezervuarlarındaki suyun zaman dilimi sonu hacmine bağlıdır. Çizelge 5.34'de görüldüğü gibi KDHTKP'nin optimal çözüm noktasında 16 nolu baraya bağlı hidrolik birim 1. ve 2. zaman dilimlerinde eşit miktarda su harcamıştır. Ancak, eşit miktarda su harcamasına rağmen, rezervuarındaki

su miktarının 1. ve 2. zaman dilimi sonundaki değerleri farklı olduğundan (Bkz. Çizelge 5.35) bu zaman dilimlerindeki aktif gc üretim değeri de farklı çıkmıştır (Bkz. Çizelge 5.30). Bu da önerilen yöntemin değişken düşülü hidroluk birimler içeren sistemlere de uygulanabileceğini göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

F-MSG algoritması genişletilmiş Lagrange fonksiyonları ile oluşturulmuş ikil problem üzerinde çözüm aramaktadır. Genelleştirilmiş Lagrange fonksiyonları, konveks olmayan amaç fonksiyonuna veya kısıtlara sahip problemler için de sıfır ikil aralık eldesini garanti etmektedir. Bu özelliğinden dolayı F-MSG algoritması, termik birimlere ait valf nokta etkisinin ve yasaklı işletim bölgelerinin, hidrolik birimlere ait yasaklı su salım bölgelerinin de modellendiği konveks olmayan güç dağıtım problemlerine uygulandığında optimal çözüm elde edilmektedir (Bkz. Bölüm 5.3 ve 5.4). Ayrıca F-MSG algoritması, popülasyon tabanlı arama yöntemlerinin aksine, tüm çözüm uzayını rassal olarak taramak yerine, genelleştirilmiş Lagrange fonksiyonu ile oluşturulmuş kısıt sağlama problemine çözüm arayarak optimal çözüme ulaşmaktadır. Böylece F-MSG algoritması birçok sezgisel ve arama algoritmasına göre, bilhassa tam optimisasyon modelinin kullanıldığı konveks olmayan optimal güç dağıtım problemlerinin çözümünde çok daha kısa zamanda optimal çözüme ulaşabilmektedir.

Önerilen yöntemlerde, OPF probleminin çözümünde bara gerilim genlikleri ve faz açıları, varsa nominal dışı çevrim oranına sahip trafolarla ait çevrim oranları ve yine varsa SVAR sistemlerinin süseptans değerleri karar değişkeni olarak seçilmekte ve sistemin tam modeli kullanılmaktadır. Böylece önerilen yöntemlerde her adımda güç akış denklemlerini (*power flow equations*) çözmeye gerek kalmadan sistemdeki aktif güç kaybının gerçek değeri modele dahil edilmektedir. Sadece başlangıç noktasında seçilen aktif ve reaktif güç üretimlerinden kalkarak karar değişkenlerinin başlangıç değerlerini hesaplamak için güç akış denklemleri çözülmektedir. Takip eden iterasyonlarda güç akış denklemlerini çözmeye gerek kalmamaktadır. Karar değişkenlerinin bu şekilde seçilmesinden ötürü aktif ve reaktif güç optimizasyonları eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir.

Sözde su fiyatı kullanarak KDHKP'nin herbir alt zaman diliminde F-MSG algoritması ile teker teker OPF problemleri çözülmektedir (Bkz. Bölüm 5.1). Sözde su fiyatının ayarlanması ile de hidrolik birimin su harcama kısıtı kontrol edilmektedir. OPF probleminin çözümünde, yukarıda anlatıldığı gibi, sistemin tam modeli kullanılmaktadır. Önerilen yöntemde ψ_i değeri ayarlanarak hidrolik birimin harcayacağı toplam su miktarı

kısıtının yerine getirilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem tek bir hidrolik birimin (veya pompayla doldurulmalı hidrolik) birimin olduğu KDHKP'lerine başarıyla uygulanabilmektedir (Bkz. Bölüm 5.1).

Sözde su fiyatının kullanıldığı yöntemde, amaç fonksiyonunun formülasyonundan dolayı, *hidrolik birimlerin harcadığı su miktarında* meydana gelen değişimler birbirini etkilemektedir. Ayrıca sistemdeki hidrolik birimler her ne kadar birbirlerinden hidrolik olarak bağımsız olsalar da sistemdeki güç üretim – tüketim dengesinden dolayı elektriksel olarak birbirleri ile ilişkilidirler ve güç üretimlerindeki değişimler bu dengeden dolayı birbirini etkilemektedir. Bu nedenle sözü geçen yöntem birden fazla hidrolik birim içeren KDHKP'nin çözümü için kullanıldığında optimal çözüme ulaşamamaktadır.

Tam model ve yaklaşık modelin kullanıldığı iteratif yöntemde, hidrotermal sistemin basit modelinin kullanılması ile tüm işletim süresine ait güç dağıtım problemi çözülmekte ve hidrolik kısıtların sağlandığı aktif güç üretim değerleri elde edilmektedir. Sonrasında, hidrolik birimlerin bulunan bu aktif güç değerleri sabit tutulmakta ve herbir alt zaman dilimindeki OPF problemi, F-MSG algoritması ile, teker teker çözülmektedir. OPF çözümünde bara gerilim genlikleri ve faz açıları, varsa nominal dışı çevrim oranına sahip trafolara ait çevrim oranları ve yine varsa SVAR sistemlerinin süseptans değerleri karar değişkeni olarak seçilmekte ve sistemin tam optimizasyon modeli kullanılmaktadır. Bundan dolayı algoritmanın bu adımında bulunan çözüm, sisteme ait tüm kısıtların sağlandığı, KDHKP'nin tam çözümüdür (Bkz. Bölüm 5.3).

Sözü edilen yöntem sabit düşülü hidrolik birimler içeren sistemlere uygulanabildiği gibi, değişken düşülü hidrolik birimler içeren sistemlere de rahatlıkla uygulanabilmektedir. Ancak sistemde değişken düşülü hidrolik birimler varsa, basit model yardımıyla yaklaşık çözüm elde edilirken, değişken düşülü hidrolik birimlerin saat başı su salımlarını karar değişkeni olarak seçmek gerekmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda, F-MSG algoritması kullanılarak KDHKP'nin çözümü için geliştirilen yöntem daha büyük boyutlardaki güç sistemlerinde KDHKP'ne uygulanmalıdır. Bunun yanı sıra ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler de modele dahil edilerek daha karmaşık ve gerçekçi sistemlerde de KDHKP'ne çözüm aranmalıdır. Ayrıca

F-MSG algoritmasının 3. Adımında Denklem (2.6) ile verilen kısıt sağlama probleminin çözümünde GAMS programı kullanılırken (Bkz. Bölüm 5), bu programda yer alan diğer çözümler (*solver*) de denenerek bunların çözüm kalitesi ve çözüm zamanı üzerine etkileri incelenmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmed, M. M. M., Ghani, M. R. A., Hassan, I., 2002, Fast and optimized hydro-thermal coordination scheduling, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, 1, 261–266.
- Amjady, N., Soleymanpour, H. R., 2010, Daily Hydrothermal Generation Scheduling by a new Modified Adaptive Particle Swarm Optimization technique, Electric Power Systems Research, 80, 723–732.
- Amjady, N., Ansari, M. R., 2013, Hydrothermal unit commitment with AC constraints by a new solution method based on benders decomposition, Energy Conversion and Management, 65, 57–65.
- Basu, M., 2003, Hopfield neural networks for optimal scheduling of fixed head hydrothermal power systems, Electric Power Systems Research, 64, 11 – 15.
- Basu, M., 2011, Artificial immune system for fixed head hydrothermal power system, Energy, 36, 606 – 612.
- Basu, M., 2014, Improved differential evolution for short-term hydrothermal scheduling, Electrical Power and Energy Systems, 58, 91–100.
- Bisht, V. S., 2012, Genetic algorithm solution for convex hydro-thermal generation scheduling problem”, Power India Conference, 1–6.
- Burachik R.S., Gasimov, R.N., Ismayilova, N.A., Kaya, C.Y., 2006, On a modified subgradient algorithm for dual problems via sharp augmented Lagrangian, Journal of Global Optimization, 34, 55-78.
- Chen, P., Chang, H., 1996, Genetic aided scheduling of hydraulically coupled plants in hydro-thermal coordination, IEEE Transactions on Power Systems, 11, 975–981.
- Fadıl, S., Yaşar, C., 2001, A pseudo spot price algorithm applied to short-term hydrothermal scheduling problem, Electric Power Components and Systems, 29, 977–995
- Fadıl, S., Yazıcı, A., Urazel, B., 2011, A security-constrained economic power dispatch technique using modified subgradient algorithm based on feasible values and pseudo scaling factor for a power system area including limited energy supply thermal units, Electric Power Components and Systems, 39(16), 1748–1768.
- Fadıl, S., Yazıcı, A., Urazel, B., 2012, A solution to security constrained non-convex economic dispatch problem by modified subgradient algorithm based on feasible values, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 43, 849–858.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fadıl, S., Urazel, B., 2013, Solution to security-constrained nonconvex pumped-storage hydraulic unit scheduling problem by modified subgradient algorithm based on feasible values and pseudo water price, *Electric Power Components and Systems*, 41(2),111–135.
- Fadıl, S., Urazel, B., 2014, A security constrained environmental/economic power dispatch technique using f-msg algorithm for a power system area including limited energy supply thermal units, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 56, 185–197.
- Fadıl, S., Urazel, B., 2014, Solution to security constrained environmental/economic pumped-storage hydraulic unit scheduling problem by modified subgradient algorithm based on feasible values and pseudo water price, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 60, 399–413.
- Fadıl, S., Urazel, B., 2015, Solution to short term hydrothermal scheduling problem by modified subgradient algorithm based on feasible values”, *ELECO 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Türkiye.
- Fang, N vd., 2014, A hybrid of real coded genetic algorithm and artificial fish swarm algorithm for short-term optimal hydrothermal scheduling, *Electrical Power and Energy Systems*, 62, 617–629.
- Farhat, I.A., El-Hawary, M.E., 2009, Optimization methods applied for solving the short term hydrothermal coordination problem, *Electric Power Systems Research*, 79, 1308–1320.
- Gasimov, R.N., 2002, Augmented lagrangian duality and nondifferentiable optimization methods in nonconvex programming, *Journal Of Global Optimization*, 24,187–203.
- Gasimov, R.N., Rubinov, A.M., 2004, On augmented Lagrangians for optimization problems with a single constraint, *Journal of Global Optimization*, 28, 153–173.
- Gasimov, R.N., Üstün, Ö., 2005, Solving the quadratic assignment problems using modified subgradient algorithm, *35th International Conference on Computers & Industrial Engineering*
- Gasimov, R.N., Ustun, O., 2007, Solving the quadratic assignment problem using F-MSG algorithm, *Journal of Industrial and Management Optimization*, 3(2), 173–191.
- Gil, E., Bustos, J., Rudnick, H., 2003, Short-term hydrothermal generation scheduling model using a genetic algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18, 1256–1264.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Guan, X., Ni, E., Li, R., Luh, P. B., 1997, An optimization-based algorithm for scheduling hydrothermal power systems with cascaded reservoirs and discrete hydro constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, 12, 1775–1780.
- Hinojosa, V.H., Leyton, C., 2012, Short-term hydrothermal generation scheduling solved with a mixed-binary evolutionary particle swarm optimizer, *Electric Power Systems Research*, 92, 162–170.
- Hota, P. K., Barisal, A. K., Chakrabarti, R., 2009, An improved PSO technique for short term optimal hydrothermal scheduling”, *Electric Power Systems Research*, 79, 1047–1053.
- Jegatheesan, R., Nor, N. M., Romlie, M.F., 2008, Newton-Raphson power flow solution employing systematically constructed Jacobian matrix, 2nd IEEE International Conference on Power and Energy, 180-185.
- Kasimbeyli, R., Ustun, O., Rubinov, A.M., 2009, The modified subgradient algorithm based on feasible values, *Optimization*, 58 (5), 535-560.
- Kumar, S., Naresh, R., 2007, Efficient real coded genetic algorithm to solve the nonconvex hydrothermal scheduling problem, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29, 738–747.
- Kumar, V. S., Mohan M. R., 2011, A genetic algorithm solution to the optimal short term hydrothermal scheduling, *Electrical Power and Energy Systems*, 33, 827–835.
- Li, C. A., vd., 1997, Hydro unit commitment in hydro-thermal optimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, 12, 764–769.
- Liao, X., vd., 2013, An adaptive chaotic artificial bee colony algorithm for short-term hydrothermal generation scheduling, *Electrical Power and Energy Systems*, 53, 34–42.
- Lu, Y., vd., 2010, An adaptive chaotic differential evolution for the short-term hydrothermal generation scheduling problem, *Energy Conversion and Management*, 51, 1481–1490.
- Mandal, K. K., Basu, M., Chakraborty, N., 2008, Particle swarm optimization technique based short - term hydrothermal scheduling, *Applied Soft Computing*, 8, 1392–1399.
- Mandal, K.K., Chakraborty, N., 2008, Differential evolution technique-based short-term economic generation scheduling of hydrothermal systems, *Electric Power Systems Research*, 78, 1972–1979.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nilsson, O., Sjelvgren, D., 1996, Mixed-integer programming applied to short-term planning of a hydro-thermal system, *IEEE Transactions on Power Systems*, 11, 281–286.
- Parastegari, M., Hooshmand, R., Khodabakhshian, A., Vatanpour, M., 2013, AC constrained hydro-thermal generation scheduling problem: Application of Benders decomposition method improved by BFPSO, *Electrical Power and Energy Systems*, 49, 199–212.
- Rockafellar R. T., Wets, R. J. B., 1998, *Variational Analysis*, Springer, Berlin.
- Sifuentes, W., Vargas, A., 2007, Short-term hydrothermal coordination considering an AC network modeling, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29, 488–496.
- Sifuentes, W., Vargas, A., 2007, Hydrothermal scheduling using benders decomposition: accelerating techniques, *IEEE Transactions on Power Systems*, 22, 1351–1359.
- Sasikala, J., Ramaswamy, M., 2010, Optimal gamma based fixed head hydrothermal scheduling using genetic algorithm, *Expert Systems with Applications*, 37, 3352–3357.
- Swain, R. K., Barisal, A. K., Hota, P. K., Chakrabarti, R., 2011, Short-term hydrothermal scheduling using clonal selection algorithm, *Electrical Power and Energy Systems*, 33, 647–656.
- Üstün Ö., 2007, Çok amaçlı portföy optimizasyon problemi ve çözüm yaklaşımları, Doktora Tezi, ESOGU Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, 178s.
- Wang, Y., vd., 2012, An improved self-adaptive PSO technique for short-term hydrothermal scheduling, *Expert Systems with Applications*, 39, 2288–2295.
- Wang, Z., He, G.Y., Chen, X., Zhou, S., 2004, A novel model of large-scale hydrothermal power system optimal scheduling, *Power Systems Conference and Exposition 2004*, 1, 518–523.
- Wanga, Y., vd., 2012, A clonal real-coded quantum-inspired evolutionary algorithm with Cauchy mutation for short-term hydrothermal generation scheduling, *Electrical Power and Energy Systems*, 43, 1228–1240.
- Wood, A.J., Wollenberg, B.F., 1996, *Power Generation Operation and Control*, John Wiley & Sons, p.209.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wu, Y., Ho, C., Wang, D., 2000, A diploid genetic approach to short-term scheduling of hydro-thermal system, *IEEE Transactions on Power Systems*, 15, 1268–1274.
- Yan, H., Luh, P. B., Guan, X., Rogan, P. M., 1993, Scheduling of hydrothermal power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 8, 1358–1365.
- Yu, S. N., 2006, Using hybrid EP and multi-pass dynamic programming for hydrothermal coordination considering reasonable spinning reserve, *Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 903–908.
- Yuan, X., Yuan, Y., 2006, Application of cultural algorithm to generation scheduling of hydrothermal systems, *Energy Conversion and Management*, 47, 2192–2201.
- Yuan, X., Wang, L., Yuan, Y., 2008, Application of enhanced PSO approach to optimal scheduling of hydro system, *Energy Conversion and Management*, 49, 2966–2972.

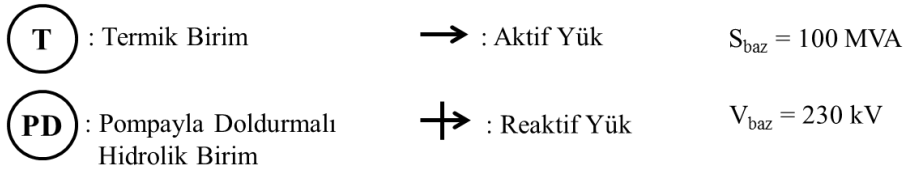
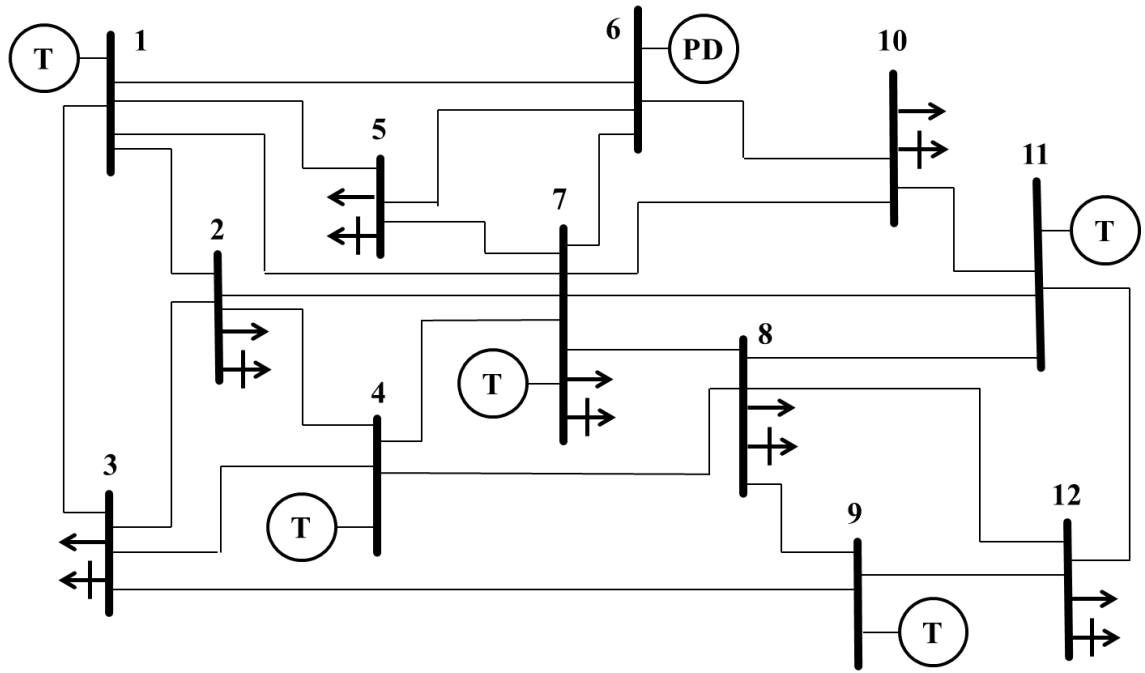
EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama –A: 12 baralı test sistemine ait veriler.

Ek Açıklama –B: 16 baralı test sistemine ait veriler.

Ek Açıklama –A: 12 baralı test sistemine ait veriler.

12 baralı test sisteminin tek hat diagramı Şekil A.1’de, hat parametreleri Çizelge A.1’de, test sisteminin yük dağılım çizelgesi Çizelge A.2’de, sistemdeki termik birimlerin *konveks* saat başı yakıt maliyeti fonksiyon sabitleri ve üretim sınırları Çizelge A.3’de, sistemdeki termik birimlerin saat başı emisyon fonksiyon sabitleri Çizelge A.4’de, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri Çizelge A.5’de verilmiştir.



Şekil A.1. 12 baralı test sistemi için tek hat diagramı.

Çizelge A.1. 12 baralı test sistemi için hat parametreleri (*pu* olarak).

Hat no (<i>l</i>)	Baradan (<i>i</i>)	Baraya (<i>k</i>)	r_{ik}	x_{ik}	$0,5 \times b_{cap,ik}$
1	1	2	0,070	0,18	0,008
2	1	3	0,080	0,25	0,008
3	1	5	0,080	0,20	0,006
4	1	6	0,050	0,15	0,003
5	1	7	0,080	0,25	0,008
6	2	3	0,050	0,20	0,006
7	2	4	0,070	0,20	0,006
8	2	7	0,080	0,18	0,005
9	3	4	0,080	0,25	0,008
10	3	9	0,100	0,30	0,011
11	4	7	0,003	0,15	0,015
12	4	8	0,100	0,30	0,011
13	5	6	0,100	0,30	0,011
14	5	7	0,080	0,20	0,010
15	6	7	0,060	0,18	0,003
16	6	10	0,080	0,25	0,008
17	7	8	0,080	0,25	0,008
18	7	10	0,060	0,18	0,005
19	7	11	0,080	0,25	0,008
20	8	9	0,060	0,18	0,005
21	8	11	0,080	0,30	0,011
22	8	12	0,100	0,30	0,011
23	9	12	0,080	0,25	0,008
24	10	11	0,060	0,20	0,006
25	11	12	0,060	0,18	0,005

Çizelge A.2. 12 baralı test sisteminin *pu* yük dağılım çizelgesi.

Bara No (i)	Yük Tipi	Alt Zaman Dilimi (j)					
		1	2	3	4	5	6
2	<i>Aktif</i>	0,20	0,80	1,00	0,80	0,40	0,20
	<i>Reaktif</i>	0,15	0,60	0,75	0,60	0,30	0,15
3	<i>Aktif</i>	0,50	1,10	1,20	1,10	0,60	0,50
	<i>Reaktif</i>	0,40	0,85	0,90	0,85	0,45	0,40
5	<i>Aktif</i>	0,30	0,90	0,80	0,90	0,25	0,30
	<i>Reaktif</i>	0,24	0,70	0,60	0,70	0,20	0,24
7	<i>Aktif</i>	0,25	1,00	1,10	1,00	0,50	0,25
	<i>Reaktif</i>	0,20	0,75	0,85	0,75	0,40	0,20
8	<i>Aktif</i>	0,40	0,70	0,90	0,70	0,30	0,40
	<i>Reaktif</i>	0,30	0,52	0,70	0,52	0,24	0,30
10	<i>Aktif</i>	0,15	0,60	1,05	0,60	0,45	0,15
	<i>Reaktif</i>	0,12	0,45	0,80	0,45	0,35	0,12
12	<i>Aktif</i>	0,20	0,90	0,95	0,90	0,50	0,20
	<i>Reaktif</i>	0,15	0,70	0,75	0,70	0,40	0,15
TOPLAM	<i>Aktif</i>	2,00	6,00	7,00	6,00	3,00	2,00
	<i>Reaktif</i>	1,56	4,57	5,35	4,57	2,34	1,56

Çizelge A.3. 12 baralı test sisteminde termik birimlerin *konveks* saat başı yakıt maliyeti fonksiyon sabitleri ve üretim sınırları.

Bağlı olduğu bara (i)	b_i	c_i	d_i	P_{Gi}^{enk} (MW)	P_{Gi}^{enb} (MW)	Q_{Gi}^{enk} (MVar)	Q_{Gi}^{enb} (MVar)
1	10	50	25	50	320	-50	150
4	20	85	30	45	180	-20	200
7	20	85	30	40	170	-20	200
9	70	215	80	5	100	-20	200
11	70	205	213	5	100	-20	200

Çizelge A.4. 12 baralı test sisteminde termik birimlerin saat başı emisyon fonksiyon sabitleri.

Bağlı olduğu bara (i)	α_i	β_i	γ_i	ζ_i	λ_i
1	4,426	-5,550	2,030	$2,0 \times 10^{-6}$	1,500
4	4,258	-6,094	3,886	$1,0 \times 10^{-6}$	2,350
7	4,258	-6,094	3,886	$1,0 \times 10^{-6}$	2,350
9	7,743	-2,147	8,438	$5,0 \times 10^{-5}$	8,833
11	8,531	-2,355	8,651	$5,0 \times 10^{-5}$	8,967

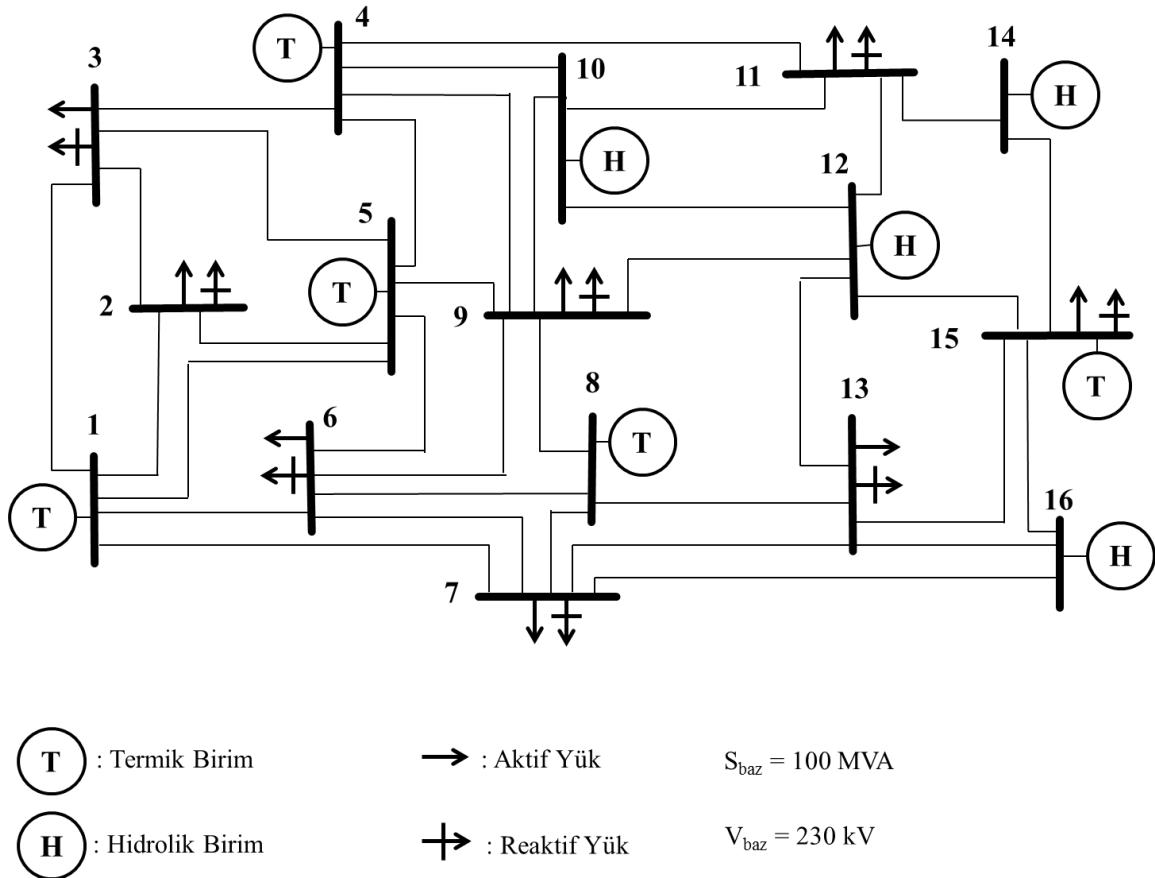
Çizelge A.5. 12 baralı test sisteminde iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri.

Hat no (l)	Baradan (i)	Baraya (k)	p_l^{enb} (MW)
1	1	2	80
2	1	3	75
3	1	5	75
4	1	6	75
5	1	7	60
6	2	3	40
7	2	4	50
8	2	7	50
9	3	4	75
10	3	9	35
11	4	7	50
12	4	8	75
13	5	6	40

Hat no (l)	Baradan (i)	Baraya (k)	p_l^{enb} (MW)
14	5	7	40
15	6	7	60
16	6	10	75
17	7	8	75
18	7	10	75
19	7	11	60
20	8	9	50
21	8	11	50
22	8	12	75
23	9	12	75
24	10	11	50
25	11	12	75

Ek Açıklama –B: 16 baralı test sistemine ait veriler.

16 baralı test sisteminin tek hat diagramı Şekil B.1’de, hat parametreleri Çizelge B.1’de, test sisteminin yük dağılım çizelgesi Çizelge B.2’de, sistemdeki termik birimlerin *konveks* saat başı yakıt maliyeti fonksiyon sabitleri ve üretim sınırları Çizelge B.3’de, sistemdeki *sabit su seviyeli* hidrolik birimlerin saat başı su salım fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları Çizelge B.4’de, sistemdeki *sabit su seviyeli* hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait parametreler Çizelge B.5’de, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri Çizelge B.6’da, sistemdeki termik birimlerin *konveks olmayan* saat başı yakıt maliyeti fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları Çizelge B.7’de, sistemdeki *değişken su seviyeli* hidrolik birimlerin saat başı su salım fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları Çizelge B.8’de, sistemdeki *değişken su seviyeli* hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait parametreler Çizelge B.9’da, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri (*değişken su seviyeli* hidrolik birimler ele alındığı durumda) ise Çizelge B.10’da verilmiştir.



Şekil B.1. 16 baralı test sistemi için tek hat diagramı.

Çizelge B.1. 16 baralı test sistemi için hat parametreleri (*pu* olarak).

Hat no (<i>l</i>)	Baradan (<i>i</i>)	Baraya (<i>k</i>)	r_{ik}	x_{ik}	$0,5 \times b_{cap,ik}$
1	1	2	0,100	0,20	0,020
2	1	3	0,015	0,18	0,015
3	1	5	0,080	0,30	0,030
4	1	6	0,050	0,20	0,020
5	1	7	0,070	0,20	0,025
6	3	2	0,050	0,25	0,030
7	5	2	0,050	0,10	0,010
8	4	3	0,050	0,20	0,020
9	5	3	0,070	0,20	0,025
10	4	5	0,100	0,20	0,020
11	4	9	0,080	0,30	0,030
12	4	10	0,070	0,20	0,025
13	4	11	0,015	0,18	0,015
14	5	6	0,020	0,10	0,010
15	5	9	0,080	0,30	0,030
16	7	6	0,100	0,30	0,030
17	8	6	0,070	0,20	0,025
18	9	6	0,060	0,18	0,015
19	8	7	0,020	0,10	0,010
20	7	13	0,070	0,20	0,025
21	16	7	0,060	0,18	0,020
22	8	9	0,080	0,30	0,030
23	8	13	0,050	0,20	0,020
24	10	9	0,020	0,10	0,010
25	12	9	0,070	0,20	0,025
26	10	11	0,060	0,18	0,020
27	10	12	0,050	0,25	0,030
28	12	11	0,100	0,20	0,020
29	14	11	0,020	0,10	0,010
30	12	13	0,100	0,20	0,020
31	12	15	0,060	0,18	0,020
32	15	13	0,080	0,20	0,020
33	16	13	0,050	0,25	0,030
34	14	15	0,050	0,20	0,020
35	16	15	0,100	0,30	0,030

Çizelge B.2. 16 baralı test sisteminin *pu* yük dağılım çizelgesi

Bara No (i)	Yük Tipi	Alt Zaman Dilimi (j)					
		1	2	3	4	5	6
2	Aktif	0,75	0,90	1,25	1,20	1,25	0,85
	Reaktif	0,55	0,60	0,95	0,90	0,95	0,60
3	Aktif	1,00	1,10	1,05	1,00	1,20	0,95
	Reaktif	0,75	0,80	0,80	0,75	0,90	0,70
6	Aktif	0,95	0,95	1,15	1,25	1,10	1,00
	Reaktif	0,70	0,65	0,85	0,95	0,80	0,75
7	Aktif	0,70	1,05	1,00	1,15	1,15	0,95
	Reaktif	0,50	0,80	0,75	0,85	0,85	0,70
9	Aktif	1,05	0,85	1,30	1,30	1,30	1,05
	Reaktif	0,80	0,60	1,00	1,00	1,00	0,80
11	Aktif	0,60	1,20	0,90	1,10	1,10	1,10
	Reaktif	0,45	0,90	0,60	0,80	0,80	0,80
13	Aktif	0,90	1,00	1,15	1,05	1,05	0,90
	Reaktif	0,65	0,75	0,85	0,80	0,80	0,65
15	Aktif	0,85	1,25	0,95	1,35	1,00	0,80
	Reaktif	0,60	0,95	0,70	1,00	0,75	0,60
TOPLAM	Aktif	6,80	8,30	8,75	9,40	9,15	7,60
	Reaktif	5,00	6,05	6,50	7,05	6,85	5,60

Çizelge B.3. 16 baralı test sisteminde termik birimlerin *konveks* saat başı yakıt maliyeti fonksiyon sabitleri ve üretim sınırları

Bağlı olduğu bara (i)	b_i	c_i	d_i	P_{Gi}^{enk} (MW)	P_{Gi}^{enb} (MW)	Q_{Gi}^{enk} (MVA _r)	Q_{Gi}^{enb} (MVA _r)
1	527	7,48	0,001495	30	350	-250	250
4	561	7,92	0,001562	45	250	-250	250
5	310	7,85	0,001940	40	250	-250	250
8	215	7,94	0,002360	50	200	-250	250
15	78	7,97	0,004820	45	250	-250	250

Çizelge B.4. 16 baralı test sisteminde *sabit su seviyeli* hidrolik birimlerin saat başı su salım fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları

<i>Bağlı olduğu bara (i)</i>	d_{1i}	d_{2i}	d_{3i}	d_{4i}	d_{5i}	P_{Gi}^{enk} (MW)	P_{Gi}^{diz} (MW)	P_{Gi}^{enb} (MW)	Q_{Gi}^{enk} (MVAr)	Q_{Gi}^{enb} (MVAr)
10	330	4,97	254,40	2,00	0,030	0	120	135	-250	250
12	320	6,20	275,00	3,80	0,018	0	150	165	-250	250
14	380	5,65	432,00	2,00	0,025	0	130	145	-250	250
16	300	6,00	343,20	2,28	0,028	0	120	135	-250	250

Çizelge B.5. 16 baralı test sisteminde *sabit su seviyeli* hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait parametreler

<i>Bağlı olduğu bara (i)</i>	V_i^{enk} (acre-ft)	V_i^{enb} (acre-ft)	$V_i^{başlangıç}$ (acre-ft)	V_i^{son} (acre-ft)	$q_{TOPLAM,i}$ (acre-ft)	r_i (acre-ft/saat)
10	30000	80000	50000	48000	17600	650
12	30000	80000	45000	46600	16000	-
14	30000	80000	46600	40600	16800	450
16	30000	80000	40000	50600	22200	-

Çizelge B.6. 16 baralı test sisteminde iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri

Hat no (l)	Baradan (i)	Baraya (k)	P_i^{enb} (MW)	Hat no (l)	Baradan (i)	Baraya (k)	P_i^{enb} (MW)
1	1	2	62,50	19	8	7	62,50
2	1	3	62,50	20	7	13	17,50
3	1	5	31,25	21	16	7	75,00
4	1	6	62,50	22	8	9	18,75
5	1	7	62,50	23	8	13	31,25
6	3	2	18,75	24	10	9	93,75
7	5	2	75,00	25	12	9	62,50
8	4	3	62,50	26	10	11	62,50
9	5	3	31,25	27	10	12	31,25
10	4	5	31,25	28	12	11	25,00
11	4	9	31,25	29	14	11	75,00
12	4	10	31,25	30	12	13	62,50
13	4	11	45,00	31	12	15	43,75
14	5	6	62,50	32	15	13	31,25
15	5	9	22,50	33	16	13	75,00
16	7	6	12,50	34	14	15	62,50
17	8	6	31,25	35	16	15	93,75
18	9	6	31,25				

Çizelge B.7. 16 baralı test sisteminde termik birimlerin *konveks olmayan* saat başı yakıt maliyeti fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları.

Bağlı olduğu bara (i)	b_i	c_i	d_i	e_i	g_i	P_{Gi}^{enk} (MW)	P_{Gi}^{enb} (MW)	Q_{Gi}^{enk} (MVA _r)	Q_{Gi}^{enb} (MVA _r)
1	527	7,48	0,001495	480	0,015	30	350	-250	250
4	561	7,92	0,001562	600	0,015	45	250	-250	250
5	310	7,85	0,001940	540	0,020	40	250	-250	250
8	215	7,94	0,002360	600	0,025	50	200	-250	250
15	78	7,97	0,004820	360	0,050	45	250	-250	250

Çizelge B.8. 16 baralı test sisteminde *değişken su seviyeli* hidrolik birimlerin saat başı su salım fonksiyonu sabitleri ve üretim sınırları.

Bağlı olduğu bara (i)	$C_{1,i}$	$C_{2,i}$	$C_{3,i}$	$C_{4,i}$	$C_{5,i}$	$C_{6,i}$	P_{Gi}^{enk} (MW)	P_{Gi}^{enb} (MW)	Q_{Gi}^{enk} (MVA _r)	Q_{Gi}^{enb} (MVA _r)
10	-0,0042	-0,42	0,030	0,90	10,0	-50	0	300	-250	250
12	-0,0040	-0,30	0,015	1,14	9,5	-70	0	300	-250	250
14	-0,0016	-0,30	0,014	0,85	7,5	-40	0	300	-250	250
16	-0,0030	-0,31	0,027	1,44	10,0	-70	0	300	-250	250

Çizelge B.9. 16 baralı test sisteminde *değişken su seviyeli* hidrolik birimlerin rezervuar hacimlerine ait parametreler

Bağlı olduğu bara (i)	V_i^{enk} (acre-ft)	V_i^{enb} (acre-ft)	$V_i^{başlangıç}$ (acre-ft)	V_i^{son} (acre-ft)	$q_{TOPLAM,i}$ (acre-ft)	r_i (acre-ft/saat)	q_{Hi}^{enk} (acre-ft / saat)	q_{Hi}^{enb} (acre-ft / saat)
10	7500	40000	20000	18000	17600	650	100	8000
12	7500	40000	15000	16600	16000	-	100	8000
14	7500	40000	16600	10600	16800	450	100	8000
16	7500	40000	10000	20600	22200	-	100	8000

Çizelge B.10. 16 baralı test sisteminde iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri (değişken su seviyeli hidrolik birimler ele alındığı durumda).

<i>Hat no (l)</i>	<i>Baradan (i)</i>	<i>Baraya (k)</i>	p_l^{enb} (MW)	<i>Hat no (l)</i>	<i>Baradan (i)</i>	<i>Baraya (k)</i>	p_l^{enb} (MW)
1	1	2	62,50	19	8	7	62,50
2	1	3	62,50	20	7	13	12,50
3	1	5	31,25	21	16	7	75,00
4	1	6	62,50	22	8	9	18,75
5	1	7	62,50	23	8	13	31,25
6	3	2	18,75	24	10	9	93,75
7	5	2	75,00	25	12	9	62,50
8	4	3	62,50	26	10	11	62,50
9	5	3	31,25	27	10	12	31,25
10	4	5	31,25	28	12	11	25,00
11	4	9	31,25	29	14	11	75,00
12	4	10	31,25	30	12	13	62,50
13	4	11	31,25	31	12	15	43,75
14	5	6	62,50	32	15	13	31,25
15	5	9	12,50	33	16	13	75,00
16	7	6	12,50	34	14	15	62,50
17	8	6	31,25	35	16	15	93,75
18	9	6	31,25				

ÖZGEÇMİŞ

Burak Urazel 04.04.1984 yılında Eskişehir’de dünyaya geldi. İlk okuldan sonra öğrenimini Eskişehir Anadolu Lisesi’nde sürdürdü. Orta okul ile liseyi burada okuduktan sonra 2001 yılında girdiği üniversite sınavında Osmangazi Üniversitesi Tıp Fakültesi’ni kazandı. Üç yıl tıp fakültesinde okuduktan sonra 2004 yılında tekrar üniversite sınavına girdi ve Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü kazandı. Anadolu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden 2008 yılında mezun olduktan sonra Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde başladığı yüksek lisans eğitimini 2011 yılında başarıyla tamamladı. 2011 yılından beri aynı bölümde doktora eğitimini sürdürmektedir. Ayrıca 2009 yılından itibaren Eskişehir Osmangazi Üniveritesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak da görev yapmaktadır.