

**BİRİM YÜKLENME PROBLEMİNİN  
MATEMATİKSEL VE AKILLI SEZGİSEL  
YAKLAŞIMLAR KULLANILARAK ÇÖZÜLMESİ**

Ümmühan BAŞARAN FİLİK  
Doktora Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Nisan-2010

# ÖZET

Doktora Tezi

## BİRİM YÜKLENME PROBLEMİNİN MATEMATİKSEL VE AKILLI SEZGİSEL YAKLAŞIMLAR KULLANILARAK ÇÖZÜLMESİ

Ümmühan BAŞARAN FİLİK

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yard.Doç.Dr. Mehmet KURBAN

2010, 127 sayfa

Güç sistemleri optimizasyonunda önemli problemlerden biri olan birim yüklenme problemi, hem matematiksel (gevşetilmiş Lagrange, ceza fonksiyonları, genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, genelleştirilmiş subgradient (MSG) ve uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient (F-MSG) hem de akıllı sezgisel (bulanık mantık ve benzetimli tavlama) yaklaşımlar kullanılarak çözülmüştür. Bu yöntemlerden genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, MSG ve F-MSG yöntemleri birim yüklenme probleminin çözümüne ilk defa uygulanmıştır. Kullanılan yöntemler, dört birimden oluşan Tunçbilek termik santrali ve on ile yüz birim arasında değişen çeşitli sistemler için farklı kısıtlar kullanılarak çözülmüş ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Birim yüklenme probleminin çözümünde, öncelikle talep edilecek yük değerlerinin en az hata ile tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Türkiye'deki yirmi altı yıla ait (1982-2007) gerçek tüketim değerleri kullanılarak önerilen yeni bir matematiksel model ile yük tahmini yapılmış ve Tunçbilek termik santrali için yaklaşık talep değerleri bulunarak birim yüklenme problemi yeniden çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Birim Yüklenme, Yük Tahmini, Güç Sistemi Optimizasyonu, Güç Sistemi Planlaması

# ABSTRACT

PhD Dissertation

## SOLVING UNIT COMMITMENT PROBLEM USING MATHEMATICAL AND INTELLIGENT HEURISTIC APPROACHES

Ümmühan BAŞARAN FİLİK

Anadolu University

Graduate School of Sciences

Electrical and Electronics Engineering Program

Supervisor: Assistant Prof. Dr. Mehmet Kurban

2010, 127 pages

The unit commitment problem, one of the most important problems in optimization of power systems, is solved both with mathematical methods (Lagrange relaxation, penalty function, augmented Lagrange penalty function, modified subgradient (MSG) and feasible modified subgradient (F-MSG)) and with intelligent heuristic methods (fuzzy logic and simulated annealing). To our knowledge, the methods of augmented Lagrange penalty function, MSG and F-MSG are firstly applied to solve the unit commitment problem. All methods are tested and the results are compared for four unit (Tuncbilek thermal plant) system and for several test systems ranging between ten units to a hundred units by using different constraints. To solve the unit commitment problem, one firstly has to forecast the load demand values of the system with minimum error. To this effect, a novel mathematical model which uses actual load demand values of Turkey for twenty six years (1982-2007) to forecast load demand values is proposed. Using the approximate forecasted demand values for Tuncbilek thermal plant, the unit commitment problem is re-solved and results are compared.

**Keywords:** Unit Commitment, Load Forecasting, Power System Optimization, Power System Planning

## TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca beni destekleyen, bilgi ve birikimlerini paylaştan tez danışmanım sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Mehmet KURBAN'a teşekkür ederim.

Tez izleme jürimde yer alarak beni yönlendiren değerli hocalarım Prof.Dr. Yalçın KÜÇÜK ve Doç.Dr. Doğan Gökhan ECE'ye katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım ile ilgili bilgilerini ve önerilerini paylaştan katkılarıyla beni yönlendiren tez savunmama katılan değerli hocam Prof.Dr. Ömer Nezh GEREK'e teşekkür ederim. Ayrıca, tez savunmama katılan Yard.Doç.Dr. Yılmaz UYAROĞLU'na teşekkür ederim.

Genelleştirilmiş Subgradient algoritması'm geliştiren Prof.Dr. Rafail GASIMOV'a ve katkılarından dolayı Yard.Doç.Dr. Aydın SİPAHİOĞLU'na teşekkür ederim.

Bana her konuda destek olan, her zaman yanımda olan canım anneme, babama ve ablalarım, çalışmalarım konusunda beni her zaman yüreklendiren, destekleyen sevgili eşim Tansu FİLİK'e sonsuz teşekkür ederim. Arkadaşlarım Hanife APAYDIN ÖZKAN ve Dr. Nuray AT'a her türlü desteklerinden ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ</b> . . . . .	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Yük Tahmini ve Birim Yüklenme Analizleri İçin Literatür Taraması	1
1.2 Tezin Amacı ve Katkıları . . . . .	2
1.3 Tezin İçeriği . . . . .	3
<b>2. YÜK TAHMİNİ ANALİZİ</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Yük Tahmini . . . . .	5
2.2 Yük Tahmini Yöntemleri . . . . .	8
<b>3. BİRİM YÜKLENME PROBLEMİ VE ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN YÖNTEMLER</b> . . . . .	<b>14</b>
3.1 Birim Yüklenme Problemi . . . . .	14
3.2 Birim Yüklenme Probleminin Çözümünde Literatürde Kullanılan Yöntemler . . . . .	16
3.3 Birim Yüklenme Probleminin Çözümünde Kullanılan Matematiksel Yaklaşımlar . . . . .	24
3.3.1 Gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi . . . . .	26
3.3.2 Ceza fonksiyonları yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi . . . . .	34

3.3.3	Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi . . . . .	35
3.3.4	MSG yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi . . . . .	37
3.3.5	F-MSG yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi . . . . .	39
3.4	Birim Yüklenme Probleminin Çözümü İçin Kullanılan Akıllı Sezgisel Yaklaşımlar . . . . .	41
3.4.1	Bulanık mantık yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi . . . . .	41
3.4.2	Benzetimli tavlama yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi . . . . .	44
<b>4.</b>	<b>UYGULAMALAR . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1	Yük Tahmini Analizi Uygulamaları . . . . .	49
4.1.1	Matematiksel model kullanılarak saatlik gerçek veriler için yük tahmini . . . . .	49
4.1.2	Yük karakteristikleri . . . . .	50
4.1.3	Yük değerlerinin modellenmesi . . . . .	52
4.1.4	Model çıktısının belirlenmesi . . . . .	61
4.1.5	Matematiksel model için uygulama ve sonuçlar . . . . .	62
4.1.6	Yük tahmininde matematiksel yaklaşım ve yapay sinir ağları yönteminin karşılaştırılması . . . . .	69
4.2	Birim Yüklenme Problemi Uygulamaları . . . . .	77
4.2.1	Matematiksel yaklaşımlar ile birim yüklenme problemi uygulamaları . . . . .	80
4.2.2	Akıllı sezgisel yaklaşımlar ile birim yüklenme problemi uygulamaları . . . . .	97
4.2.3	Birim yüklenme probleminin çözümünde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması . . . . .	104
4.3	Birim Yüklenme Probleminin Yük Tahmini Analizi Kullanılarak Optimum Çözümlemesi . . . . .	108
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR . . . . .</b>	<b>114</b>
	<b>KAYNAKLAR . . . . .</b>	<b>117</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1	6 girişli-2 çıkışlı YSA yapısı . . . . .	12
3.1	İkil optimizasyon teorisinin grafiksel gösterimi . . . . .	25
3.2	i.birimin iki mümkün durumu . . . . .	32
3.3	Gevşetilmiş Lagrange yönteminin akış diyagramı . . . . .	33
3.4	Bulanık mantık sistemi . . . . .	43
3.5	Benzetimli tavlama yönteminin temel akış şeması . . . . .	45
3.6	Birim yüklenme probleminin benzetimli tavlama yöntemi ile çözümünün akış şeması . . . . .	47
3.7	İkinci derece gradient yönteminin akış şeması . . . . .	48
3.8	Lamda öteleme yöntemi . . . . .	48
4.1	2002-2005 yılları için her haftaya ait toplam enerji değerleri . . .	51
4.2	2002-2005 yıllarına ait saatlik verilerin 1-B gösterimi . . . . .	51
4.3	2002-2005 yıllarına ait saatlik verilerin 2-B gösterimi . . . . .	51
4.4	Ocak ayı için saatlik yük değişimleri . . . . .	52
4.5	Önerilen yöntemin bölümleri a) Haftalık ekseninde yıllık yük değişimleri b)Haftalık ekseninde haftalık artık yük değişimleri c)(a) 1-B normalize edilmiş saatlik yük değişimleri (b) 2-B normalize edilmiş saatlik yük değişimleri d) Saatlik verilerin 1-B gösterimi (4 yıllık değerler) . . . . .	53
4.6	1982- 2007 yıllarına ait yıllık yük değerleri . . . . .	54
4.7	1982-2007 yıllarına ait toplam enerji modeli (2002-2005 yıllarına ait değerler saatlik gerçek değerlerdir) . . . . .	54
4.8	Yıllara bağlı olarak artan fonksiyon ve bu fonksiyon için bulunan model . . . . .	56
4.9	(a) $g_a(h)$ (b) $g_b(h)$ fonksiyonlarının grafikleri . . . . .	56
4.10	$g_a(h)$ ve sekiz katsayılı sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşan model ve bu modelin grafiği . . . . .	57
4.11	$g_a(h)$ ve sekiz katsayılı FS'nin toplamından oluşan modelin grafiği	58

4.12 $g_b(h)$ ve sekiz katsayılı sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşan model . . . . .	58
4.13 $g_b(h)$ ve sekiz katsayılı FS'nin toplamından oluşan modelin grafiği	59
4.14 Normalize edilen saatlik yük değişimlerinin (a) 2-B (b) 1-B gösterimi	60
4.15 Haftalık model yapısı ve modellenen yüzey . . . . .	61
4.16 Önerilen yaklaşımın temel yapısı . . . . .	62
4.17 2002-2005 yılları için $L_{(3,1)}^m$ modeliden elde edilen yüzey çıktısı . .	64
4.18 2002-2005 yılları için gerçek yük ve $L_{(3,1)}^m$ modeliden bulunan yük değerleri (MAPE = % 5.74, RMSE= 1373.3, normalize edilen RMSE= 57.220) . . . . .	64
4.19 2002-2005 yılları için $L_{(3,1)}^m$ modeliden elde edilen hata yüzeyi . . .	65
4.20 $L_{(3,1)}^m$ modelinden bulunan haftalık model çıktısı ve gerçek yük değerlerinin 1-B'lu gösterimi (MAPE = % 1.87, RMSE= 70250, normalize edilen RMSE= 418.154) . . . . .	67
4.21 $L_{(3,1)}^m$ modelinden bulunan aylık model çıktısı ve gerçek yük değerlerinin 1-B'lu gösterimi (MAPE = %1.50, RMSE= 237800, normalize edilen RMSE= 330.277) . . . . .	67
4.22 $L_{(3,1)}^m$ modelinden bulunan yıllık model çıktısı ve gerçek yük değerlerinin 1-B'lu gösterimi (MAPE = %0.73, RMSE= 1082900, normalize edilen RMSE= 123.958) . . . . .	67
4.23 2006 yılı için gerçek yük ve $L_{(3,1)}^m$ modeliden bulunan yük değerleri (MAPE = % 4.89, RMSE= 1324.2) . . . . .	68
4.24 2002-2005 yılları için $L_{(3,1)}^m$ modeliden elde edilen hata yüzeyi . . .	68
4.25 Yıllık yük değişimi grafiği . . . . .	69
4.26 Haftalık artık yük değerleri grafiği . . . . .	69
4.27 Gerçek yük değerleri ve polinom modeli . . . . .	70
4.28 Gerçek yük değerleri ve birinci üstel fonksiyon modeli . . . . .	71
4.29 Gerçek yük değerleri ve ikinci üstel fonksiyon modeli . . . . .	71
4.30 Altı katsayılı FS modeli . . . . .	71
4.31 Sekiz katsayılı FS modeli . . . . .	72
4.32 (a) Önerilen YSA yapısı (b) Önerilen YSA için Giriş/Çıkış yapısı	73
4.33 2005 yılı için performansın aşama sayısına göre değişimi (Birinci YSA yapısı) . . . . .	74



4.34	2005 yılı için performansın aşama sayısına göre değişimi (İkinci YSA yapısı) . . . . .	74
4.35	2005 yılı için performansın aşama sayısına göre değişimi (Üçüncü YSA yapısı) . . . . .	75
4.36	2005 yılı için $L_{(1,1)}^m$ matematiksel modelinden bulunan yüzey çıktısı	76
4.37	2005 yılı için ikinci YSA yapısı kullanılarak bulunan yüzey çıktısı	76
4.38	2005 yılı için $L_{(1,1)}^m$ matematiksel modelinden bulunan hata yüzeyi	76
4.39	2005 yılı için ikinci YSA yapısından bulunan hata yüzeyi . . . . .	77
4.40	Bazı kurallar arasındaki ilişkinin gösterimi . . . . .	98
4.41	a) ÜYK b) BM c) AYM'nin üyelik fonksiyonları . . . . .	99
4.42	Maliyetin üyelik fonksiyonu . . . . .	100
4.43	Dört birimli sistem için bulunan maliyet değerleri . . . . .	106
4.44	On birimli sistem için bulunan maliyet değerleri . . . . .	107

## ÇİZELGELER DİZİNİ

4.1	2002-2005 yılları için farklı modellerde MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri . . . . .	63
4.2	Eğitim ve test verileri için MAPE and RMSE değerleri . . . . .	63
4.3	2002-2005 yılları için haftalık farklı modellerde MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri . . . . .	65
4.4	2002-2005 yılları için aylık farklı modellerde MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri . . . . .	66
4.5	2002-2005 yılları için yıllık farklı modellerde MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri . . . . .	66
4.6	Farklı matematiksel modeller ve YSA yapıları için MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri . . . . .	75
4.7	Tunçbilek termik santraline ait ÜYK, BM, AYM, KPM, $T_{i,up}$ , $T_{i,down}$ değerleri . . . . .	78
4.8	Talep edilen yük değeri (MW) . . . . .	78
4.9	On birimli sisteme ait ÜYK, BM, AYM, KPM, $T_{i,up}$ , $T_{i,down}$ , $T_{i,cold}$ değerleri . . . . .	79
4.10	On birimli sistem için talep edilen yük değeri (MW) . . . . .	80
4.11	Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları - 1. durum . . . . .	80
4.12	Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları - 2. durum . . . . .	81
4.13	Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları - 3. durum . . . . .	81
4.14	Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum . . . . .	82
4.15	Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları(On birim) - 2. durum . . . . .	82
4.16	Gevşetilmiş Lagrange yöntemi için uygun birim kombinasyonları(On birim) - 3. durum . . . . .	83

4.17	Ceza fonksiyonları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 1. durum . . . . .	83
4.18	Ceza fonksiyonları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 2. durum . . . . .	84
4.19	Ceza fonksiyonları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 3. durum . . . . .	84
4.20	Ceza fonksiyonları yönteminin uygulanması sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum . . . . .	85
4.21	Ceza fonksiyonları yönteminin uygulanması sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 2. durum . . . . .	85
4.22	Ceza fonksiyonları yönteminin uygulanması sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 3. durum . . . . .	86
4.23	Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 1. durum . . . . .	86
4.24	Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 2. durum . . . . .	87
4.25	Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 3. durum . . . . .	87
4.26	Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum . . . . .	88
4.27	Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 2. durum . . . . .	88
4.28	Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 3. durum . . . . .	89
4.29	MSG yöntemiyle bulunan uygun birim kombinasyonları - 1. durum	89
4.30	MSG yöntemiyle bulunan uygun birim kombinasyonları - 2. durum	90
4.31	MSG yöntemiyle bulunan uygun birim kombinasyonları - 3. durum	90
4.32	MSG yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum . . . . .	91
4.33	MSG yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 2. durum . . . . .	91
4.34	MSG yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 3. durum . . . . .	92

4.35 F-MSG yöntemi ile Tuncbilek termik santrali için uygun birim kombinasyonu - 1. durum . . . . .	92
4.36 F-MSG yöntemi ile Tuncbilek termik santrali için uygun birim kombinasyonu - 2. durum . . . . .	93
4.37 F-MSG yöntemi ile Tuncbilek termik santrali için uygun birim kombinasyonu - 3. durum . . . . .	93
4.38 F-MSG'nin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum . . . . .	94
4.39 F-MSG'nin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 2. durum . . . . .	94
4.40 F-MSG'nin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 3. durum . . . . .	95
4.41 Yirmi birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar	95
4.42 Kırk birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar	96
4.43 Altmış birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar . . . . .	96
4.44 Seksen birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar . . . . .	97
4.45 Yüz birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar	97
4.46 Maliyet değerlerinin bazı sonuçları . . . . .	100
4.47 Bulanık mantık yöntemi ile bulunan en uygun birim kombinasyonları	100
4.48 Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda bulunan her periyottaki birim kombinasyonları (İkinci derece gradient) - 1. durum . . . . .	101
4.49 Benzetimli tavlama yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları ve TM (Lamda-öteleme) - 1. durum . . . . .	101
4.50 Benzetimli tavlama yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları - 2. durum . . . . .	102
4.51 Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda bulunan her periyottaki birim kombinasyonları - 3. durum . . . . .	102
4.52 Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları - 1. durum . . . . .	103

4.53	Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları - 2. durum . . . . .	103
4.54	Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları - 3. durum . . . . .	104
4.55	Tunçbilek termik santralinde tüm yöntemler için maliyet değerleri	105
4.56	On birimli sistemde tüm yöntemler için maliyet değerleri . . . . .	105
4.57	Tunçbilek termik santrali için matematiksel yöntemlerle farklı durumlarda bulunan sonuçlar . . . . .	107
4.58	On birimli sistem için matematiksel yöntemlerle farklı durumlarda bulunan sonuçlar . . . . .	108
4.59	Matematiksel model ile tahmin edilen yük değerleri . . . . .	109
4.60	YSA ile tahmin edilen yük değerleri . . . . .	109
4.61	Gerçek yük değerleri . . . . .	110
4.62	Tunçbilek termik santralinde benzetimli tavlama yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri . . . . .	110
4.63	Tunçbilek termik santralinde genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri . . . . .	111
4.64	Tunçbilek termik santralinde MSG yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri . . . . .	111
4.65	Tunçbilek termik santralinde F-MSG yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri . . . . .	112

## SİMGELELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

1-B	:Bir boyutlu
2-B	:İki boyutlu
AYM	:Artımsal yakıt maliyeti (\$/MWh)
BM	:Başlangıç maliyeti
$C_p$	:Termal denge sıcaklığı
DCT	:Ayrık kosinüs dönüşümü
DP	:Dinamik programlama
$E_c$	:Mevcut konfigürasyon enerji seviyesi
$E_{cong}$	:Verilen konfigürasyonun enerjisi
EKKY	:En küçük kareler yöntemi
$E_t$	:Deneme konfigürasyonunun enerji seviyesi
FLC	:Bulanık mantık denetleyici
F-MSG	:Uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient algoritması
GA	:Genetik algoritma
h	:Hafta
g	:Gün
$q^*$	:İkil değer
$J^*$	:Asıl değer
K	:Sabit
KPM	:Kapanma maliyeti
l	:Lagrange çarpanı
$L(s, g, h, y)$	:Gerçek yük verileri
M	:Lagrange çarpanı
MAPE	:Ortalama mutlak yüzdelik hata
Maks	:Maksimum
Min	:Minimum
MSG	:Genelleştirilmiş subgradient algoritması
N	:Birim sayısı
OC	:İşletme maliyeti
P	:Periyot

$P_{cong}$	:Boltzman dağılımı
$P_d(t)$	:Talep edilen yük değeri (MW)
$P_i$	:i.birimin çıkış gücü (MW)
$P_{i,min}$	:i.birimin minimum çıkış gücü (MW)
$P_{i,maks}$	:i.birimin maksimum çıkış gücü (MW)
$P_r(t)$	:Dönme rezervi miktarı (MW)
$RD_i$	:Rampa aşağı oranı (MW/h)
$RU_i$	:Rampa yukarı oranı (MW/h)
RMSE	:Hata karelerinin ortalamasının karekökü
s	:Saat
$RU_i$	:Rampa yukarı oranı (MW/h)
$T$	:Periyot
TM	:Toplam maliyet (\$)
$T_{i,cold}$	:i. birimin soğuma başlangıç süresi
$T_{i,down}$	:En küçük devreden çıkış süresi
$T_{i,on}$	:i. birimin sürekli devrede olduğu süre
$T_{i,off}$	:i. birimin sürekli kapalı olduğu süre
$T_{i,up}$	:En küçük devreye giriş süresi
$u_i(t)$	:i.birimin t.zamandaki durumu
ÜYK	:Üretim yük kapasitesi
VIOL	:Violation
y	:Yıl
YSA	:Yapay sinir ağları
$\lambda$	:Lagrange çarpanı

Ant colony algorithm	:Karıncı koloni algoritması
AR	:Oto regresif
ARMA	:Oto regresif-ortalama
Augmented Lagrangian	:Genişletilmiş Lagrangian
Branch and bound algorithm	:Dal ve Sınır Algoritması
Evolutionary programming	:Evrimsel programlama

Decomposition techniques	:Ayrıştırma teknikleri
Expert systems	:Uzman sistemler
F-MSG	:Uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient
Fourier series	:Fourier serileri
Fuzzy logic	:Bulanık mantık
GAMS	:General algebraic modeling system
Genetic algorithm	:Genetik algoritma
Gev. Lagrange	:Gevşetilmiş Lagrange
Heuristic techniques	:Sezgisel yaklaşımlar
Integer programming	:Tamsayı programlama
Intelligent techniques	:Akıllı teknikler
Interior point algorithm	:İç nokta algoritması
Iteration techniques	:Öteleme teknikleri
Kalman filter	:Kalman süzgeci
Lagrange relaxation	:Gevşetilmiş Lagrange
Load forecasting	:Yük tahmini
Neural network	:Yapay sinir ağları
Non-convex	:Dışbükey olmayan
Nonlinear programming	:Doğrusal olmayan programlama
MA	:Hareketli ortalama
MATLAB	:Matrix laboratory
Mixed integer programming	:Karma tamsayı programlama
MSG	:Genelleştirilmiş subgradient
Peak load	:Tepe yük
Penalty function	:Ceza fonksiyonları
Priority list	:Öncelik listesi
Self-organized map	:Kendi kendini düzenleyen haritalar
Simulated Annealing	:Benzetimli tavlama
Tabu search algorithm	:Tabu araştırma algoritması
TEİAŞ	:Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
Time series	:Zaman serileri
Unit commitment	:Birim yüklenme
Wavelet transform	:Dalgacık dönüşümü



## 1. GİRİŞ

Kullanımı kolay ve istenildiğinde diğer enerji türlerine dönüştürülebilen elektrik enerjisinin tüketimi, yıllara bağlı olarak artış göstermektedir. Artan bu enerji talebini en uygun şekilde karşılayabilmenin yolu, ileriye dönük doğru planlamaların yapılmasıyla mümkündür. Enerji talebini karşılamak ve düşük maliyetle üretimi gerçekleştirmek açısından yük tahmini analizi ve birim yüklenme probleminin çözümü oldukça önemlidir.

Yük tahmini analizi kullanılarak elektrik enerji sistemlerinin gelecekte talep edeceği elektrik enerjisi ihtiyacı ve puant yük karşılanabilecek ve bu şekilde enerji sistemleri genişletilebilecektir [1]. Birim yüklenme problemi ise güç sisteminin ekonomik işletilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu probleminin çözümü ile üretim birimlerinin serviste kalacağı süre ve periyot belirlenir. Amaç, en az maliyetle talep edilen gücün belirlenen kısıtlar altında karşılanmasıdır. Bu problem, doğrusal olmayan, karma tamsayılı ve dışbükey olmayan karmaşık bir optimizasyon problemi olarak tanımlanmaktadır. Yerel şirketlerin araştırmalarına göre farklı birim yüklenme paylaşımlarıyla üretim maliyeti değeri her gün milyon dolarlara ulaşmaktadır. Bu durumda, üretim birimleri arasında yapılacak daha iyi yük paylaşımlarıyla milyon dolarlık zararlar engellenebilecektir [2–3].

Yük tahmininin doğru bir şekilde yapılması, birim yüklenme probleminin çözümünün geliştirilmesinde ilk adımdır [4]. Yük tahmini analizinin ve birim yüklenme probleminin gerçekte birlikte ele alınması gerekmektedir. Yük tahmini analizinde yapılacak bir hata, birim yüklenme probleminin sonucunu doğrudan etkilemektedir. Benzer şekilde, yük tahmini analizi doğru yapıp, birim yüklenme problemi uygun bir şekilde çözülmezse, bu durumda da hatalı maliyet değerleri ortaya çıkabilmektedir. Dolayısıyla, en düşük maliyeti elde etmek için bu iki problemin birlikte çözülmesi ve en uygun yöntemlerin kullanılması oldukça önemlidir.

### 1.1 Yük Tahmini ve Birim Yüklenme Analizleri İçin Literatür Taraması

Yük tahmini analizi kısa, orta ve uzun dönem olmak üzere üç kısımda incelenir. Literatürde, kısa dönem yük tahmini analizi için kullanılan başlıca yöntemler şunlardır: Regresyon tabanlı yöntemler [5], Box Jenkins modeli [6], zaman serileri

yaklaşımı [7–11], Kalman süzgeci [12], YSA modelleri [13–22] ve YSA ile yapılan hibrit yaklaşımlardır [23–24]. Son zamanlarda, istatistiksel yöntemler ve diğer yapay zekâ yaklaşımlarının hibrit olarak kullanıldığı yöntemler de bu problemin çözümü için önerilmiştir. Bayesyen çıkarıma [25–26], kendi kendini düzenleyen haritalar [27], dalgacık dönüşümleri [28–29] ve parçacık sürü optimizasyonudur [30].

Orta ve uzun dönem yük tahmini analizleri de güç sistemleri planlanmasında oldukça önemlidir. Orta dönem yük tahmini analizi için zaman serileri yaklaşımları [31] ve Fourier serileri (FS) [32] yaklaşımları kullanılmıştır. Uzun dönem yük tahmini yıl içindeki tepe yük değerlerinin belirlenmesi ve uzun dönem planlama için önemlidir. Uzun dönem yük tahmini içinde kullanılan en önemli yöntemler, zaman serileri analizi [9–11], hiyerarşik yapay sinir ağları [33] ve destek vektör makinesi [34] yöntemleridir. Kısa, orta ve uzun dönem saatlik yük tahmini analizi yapan matematiksel model yaklaşımı ise yeni bir yöntem olarak 2009 yılında sunulmuştur [35–36].

Birim yüklenme problemi, amaç fonksiyonu ve kısıtları dışbükey olmayan, doğrusal olmayan, karma tamsayılı çözümü zor olan bir problemdir [2]. Bu problemi çözmek için matematiksel tabanlı ve sezgisel yaklaşımlara dayalı çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Matematiksel tabanlı yöntemler ikil optimizasyon teorisi temeline dayanmaktadır. Kullanılan başlıca yöntemler, detaylı sıralama [37], öncelik listesi [38–40], dinamik programlama (DP) [41–42], tamsayı ve doğrusal programlama [43–44], dal ve sınır algoritması [45–46], Lagrange tabanlı yöntemler [47–56], iç nokta algoritması [62], tabu araştırma yöntemi [58–61], benzetimli tavlama [62–64], uzman sistemler [65–67], bulanık mantık [68–69], YSA [70–73], genetik algoritmalar(GA) [74–77], evrimsel programlama [78–80], memetik algoritma [81], karınca koloni algoritması [82–83] ve bazı hibrit yaklaşımlardır [84–90].

## 1.2 Tezin Amacı ve Katkıları

Bu tez çalışmasında, birim yüklenme probleminin maliyet değerinin azalmasına yönelik yapılan çalışmalar sunulmuştur. Bu amaçla birim yüklenme probleminin çözümü için genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları ve Gasimov tarafından önerilen MSG, F-MSG yöntemleri literatürde ilk defa bu tez çalışmasında uygulanmıştır. Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi, doğrusal olmayan p-

rogramlama problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Bu yöntem Lagrange ve ceza fonksiyonları yönteminin birleştirilmesinden oluşmuştur [91]. MSG ve F-MSG yöntemi, dışbükey olmayan problemin çözümü için, kısıt ve amaç fonksiyonu dönüşümleri ile oluşan görüntü kümesine, destek hiperdüzlemlerle yaklaşma yerine konilerle yaklaşma üzerine kurulmuştur [92–95]. Dışbükey olmayan problemlerde, amaç değeriyle klasik Lagrange ikil probleminin en iyi amaç değerleri arasında ikil aralık oluşabilmektedir. MSG ile, dışbükey olmayan bir problem olan birim yüklenme için de asıl ve ikil maliyet arasında ortaya çıkan bağıl ikil boşluk değeri ortadan kaldırılarak asıl ve ikil maliyet değerleri birbirine eşit olmuş ve kullanılan diğer yöntemlere göre en düşük maliyet değeri elde edilmiştir. Bu yöntem ile problem çözülürken başlangıç değerinin seçimi önemli olduğundan, uygun başlangıç değerleri diğer yöntemlerden bulunan bazı sonuçlardan alınmıştır.

Güç sistemlerinde, santralde bulunan birimlerin uygun şekilde yüklenebilmesi için talep edilecek yük değerlerinin önceden bilinmesi gerekmektedir. Bu da ancak doğru ve kapsamlı bir yük tahmini analizi ile yapılabilmektedir. Burada, Türkiye’deki 1982-2007 yıllarına ait gerçek tüketim değerleri kullanılarak yük tahmini analizi için kısa-orta ve uzun dönem tahmin aralıklarında saatlik çözünürlükte sonuçlar veren, literatürde benzeri olmayan ve çok yönlü uygulamaları olan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yöntem ile yakın geleceği tahmin etmenin yanında birkaç yıl içinde yük değerlerini yeni yük değerlerine ihtiyaç duyulmaksızın saatlik olarak bulmak mümkün olmaktadır. Önerilen matematiksel yaklaşım, 2002-2005 yıllarına ait saatlik gerçek veriler kullanılarak bu durum için ayrıca matematiksel fonksiyonlar bulunmuş ve YSA yaklaşımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu iki yaklaşım ile 2002-2005 yıllarına ait saatlik gerçek yük değerleri kullanılarak 2006 yılına ait yük değerleri tahmin edilmiş ve bu değerler yardımıyla Tunçbilek termik santrali için yaklaşık yük talebi belirlenmiş ve birim yüklenme problemi yeniden çözülerek bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### 1.3 Tezin İçeriği

Bu tez çalışması, beş bölümden oluşmaktadır. Kalan bölümlerde ele alınan konuların içerikleri şu şekildedir:

İkinci bölümde, yük tahmini analizi ve önemi, kısa, orta ve uzun dönem yük tahmini analizleri detaylı olarak anlatılmıştır. Literatürde bu analizler için kullanılan yöntemler hakkında kısaca bilgiler verilmiştir. Ayrıca, yük tahmini analizinin birim yüklenme problemi için önemi açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, birim yüklenme probleminin güç sistemleri optimizasyonundaki önemi anlatılmıştır. Probleme ait amaç ve kısıt fonksiyonları verilmiştir. Literatürde bu problemin çözümü için kullanılan yöntemler kısaca anlatılmıştır. Matematiksel yöntemlerden gevşetilmiş Lagrange yöntemi kullanılarak, birim yüklenme probleminin çözümü sunulmuştur. Bunun yanında farklı matematiksel yöntemler, ceza fonksiyonları, genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi, MSG ve F-MSG yöntemleri anlatılarak birim yüklenme problemine uygulamalarının nasıl olacağı açıklanmıştır. Problemin çözümünde, kullanılan akıllı sezgisel yöntemlerden olan bulanık mantık ve benzetimli tavlama yöntemi detaylı olarak incelenmiştir.

Dördüncü bölümün ilk kısmında, yük tahmini analizi için önerilen matematiksel model sunulmuştur. Bu modelin YSA ile karşılaştırılması sonucu elde edilen değerler verilmiş ve matematiksel modelin üstün olan ve olmayan yönleri tartışılmıştır. İkinci kısmında ise, birim yüklenme probleminin çözümünde gevşetilmiş Lagrange, ceza fonksiyonları, genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, MSG, F-MSG, bulanık mantık ve benzetimli tavlama yöntemi dört birimden oluşan Tunçbilek termik santrali ve literatürdeki çalışmalarda kullanılan on birimli sistemlere olan uygulamaları verilmiştir. Ayrıca, daha çok birimden oluşan sistemlerdeki değişimleri görmek amacıyla, on birimli sistem, yirmi, kırk, altmış, seksen ve yüz birimli sistem haline dönüştürülerek bu sistemler için bulunan sonuçlar sunulmuştur. Kullanılan bütün yöntemler maliyet değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Son kısmında ise, önerilen yük tahmini analizinden bulunan yük değerleri kullanılarak, Tunçbilek termik santralinin bu değerlere göre yeniden yüklenmesi sağlanmıştır.

Beşinci bölüm, sonuçlar kısmından oluşmaktadır. Bu bölümde, birim yüklenme problemi için kullanılan yöntemlerin birbirine göre avantajları ve dezavantajları sunulmuştur. Önerilen yük tahmini analizinin sonuçları tartışılmıştır. Birim yüklenme probleminin yük tahmini analizi kullanılarak optimum çözümlenmesinin önemi ortaya konulmuştur.

## 2. YÜK TAHMİNİ ANALİZİ

Bu bölümde, yük tahmini analizi ve önemi anlatılmıştır. Yük tahmini analizi için literatürde kullanılan yöntemler kısaca sunulmuştur Tez çalışmasında kullanılan YSA yöntemi ise detaylı olarak verilmiştir. Yük tahmini analizi için geliştirilen matematiksel yöntem ise dördüncü bölümde detaylı olarak incelenmiştir.

### 2.1 Yük Tahmini

Yük tahmini analizi, elektrik enerjisinin planlanmasının ilk adımıdır. İyi bir sistem planlaması için, enerji ihtiyacının ve tepe yük değerlerinin tahmin edilmesi gereklidir. Enerji santrallerine yapılması gereken eklemeler ve/veya yeni enerji santrallerinin kurulması, tepe yük değerleri de göz önüne alınarak, öngörülen enerji talebini karşılamak üzere belirlenir. Yük tahmini sonuçlarına göre, üretimle birlikte iletim - dağıtım sistemlerine yapılması gereken kapasite eklemeleri ve bunlara ilişkin yatırım maliyetleri de belirlenmektedir. Elektrik enerjisinin depolanmaması, talep tahminindeki doğruluk derecesinin önemini artırmaktadır. Yük talep tahmininin doğruluğu; elektrik güç sistemlerinin güvenilirliği ve verimliliği, santral üniteleri arasında optimizasyon, hidrotermal koordinasyonu ve yakıt tahsisi gibi enerji sisteminin işletme özelliklerini etkiler. Yük tahmininde yapılacak hatalar, ileride güç sistemi planlamasında önemli problemlere yol açabilir. Yapılan tahminin gelecekteki değer altında kalması sistemin aşırı yüklenmesine, enerji kalitesinin düşmesine, tahminin yüksek olması ise maliyetin artmasına, sistemin düşük kapasite ile çalışmasına neden olmaktadır. Sistemin bu şekilde çalışmaması için, eldeki veriler arttıkça, tahminlerin ve buna bağlı olarak planların yenilenmesi gerekir [1].

Elektrik enerjisi tüketimi tahminine yönelik çalışmalar üç sınıfta değerlendirilebilir:

- Kısa dönem yük tahmini: Bir saatten bir aya kadar olan dönemleri kapsamaktadır.
- Orta dönem yük tahmini: Bir aydan bir yıla kadar olan dönemleri kapsamaktadır.
- Uzun dönem yük tahmini: Bir yıldan daha uzun dönemleri kapsamaktadır.

Kısa dönem yük tahmini analizi ile enerji santralleri arasında yük paylaşımı ve üretim birimlerinin devreye girme-çıkma durumu belirlenir. Genellikle, günlük yük eğrisindeki tepe yük değerleri, gerçek zamanlı olarak önceden görülmeye çalışılır. Bakım programları hazırlanır, hidrolik santraller için akarsu akış koşulları ve su haznesinde tutulması gereken su miktarı belirlenir, termik santrallerde ise yakıt miktarı saptanır, buhar akışı ile ilgili veriler belirlenir ve tahmin edilen yük değerlerine göre santralin birimlerinin yüklenmesi sağlanır.

Orta dönem yük tahmini, fiziksel donanımların planlamasını kapsadığı için, oldukça önemlidir. Bu aşamada iletim sistemi genişletilir ve iletim, dağıtım sistemleri ile kısa sürede devreye alınabilecek birimler belirlenir. Ayrıca dağıtım sistemlerinin planlanması, toplu planlama çalışmaları ve ekonomik incelemelerde, satış tarifelerini, bakım periyotları ve yakıt kaynaklarını belirlemek amacıyla da kullanılır.

Uzun dönem yük tahmininde öncelikle, planlama stratejileri belirlenir. Bunun yanında yakıt ihtiyacı ve yakıt kaynaklarının belirlenmesi, sermayenin sağlanması gibi konular da yine bu dönemde gerçekleşir. Uygulamada en çok ihtiyaç duyulan uzun vadeli yük tahminidir. Çünkü bu aşamada oldukça önemli kararlar alınır ve yüksek sermayeler kullanılır ve üretim planlamaları yapılır.

Yük tahmininde önemli olan sanayi ve toplumun ihtiyaç duyduğu yer ve zamanda, elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamaya yeterli, güvenilir ve gereğinden az ya da fazla olmayan miktarı saptamaktır. Elektrik enerjisi planlarının gerçekleştirilmesinde, her bir santralin, birincil enerji kaynağının sağlanması, yerinin seçilmesi, fizibilite çalışmalarının yapılması, finansman sağlanması, yapımının aksatılmadan yürütülmesi, işletme ekiplerinin hazırlanması ve işletmesinin aksamadan yürütülmesi gerekir [1].

Uzun dönem yük tahminlerinde belirsizlikler fazla olduğundan kesin ve hassas bir tahmin yapmak mümkün değildir.

Yük tahmini analizi yapılırken oluşan hatalarının üç temel nedeni şunlardır:

- Yükün değişimine etki eden değişkenlerin belirlenmesinde yapılan hatalar.
- Matematiksel yük modeli ile yapılan genelleme ve model parametrelerinin sınırlı sayıda geçmiş veriden elde edilmesinden kaynaklanan hataların oluşturduğu yöntemsel hatalar.

- Giriş değişkenlerindeki hatalar (hatalı alınmış veriler, v.b.).

Yük tahmini için birçok yaklaşım mevcut. Önemli olan en doğru ve en hatasız olanın belirlenmesidir. Bu yaklaşımlar uygulanırken, bazı sorularında yanıtlanması gerekir. Bu sorular şunlardır:

- Tepe talebi mi yoksa yükün ayrı olarak mı tahmin edilmesi gerekiyor?
- Yük tahmini yaparken geçmişteki veriler, bütün olarak mı yoksa her tüketici grubu için ayrı olarak mı yapılmalıdır?
- Sınır hava koşulları mı yoksa orta hava koşulları mı kullanılmalıdır?
- Tahmin yaparken detaylı ve kesin matematiksel hesaplamalar mı kullanılmalıdır?

Birinci soru için, ilk seçenek tepe yükün, doğrudan hesaplanmasıdır. Bu durumda sonuca doğrudan gidilebilir; fakat ekonomik değişimler göz ardı edilmiş olur. İkinci seçenek ise, yük tahmini yaparak yükü belirlemektir. Bu seçenek yük faktörünün de hesaplanması anlamına gelir. Bu seçenekte enerji yüke göre belirlendiği için daha düzenlidir ve nüfusa bağlı ve ekonomik faktörler de ihmal edilmemiş olur; fakat düzensiz değişen yük faktörleri, hatalı tahminlere yol açabilir. Bu durumda tüketiciler, ayrı gruplara ayrılarak her grup için ayrı tahminler yapılır. Sonuçta tüm bu tahminler birleştirilerek ihtiyaç duyulan toplam yük belirlenir. Bunun sonucunda tahminin yanlış yönlendirilmesi önlenmiş olur. İkinci seçenek ise toplam yükün bir bütün olarak tahmin edilmesidir. Bu seçenekte kullanım kolaylığı ve büyüme eğiliminin daha rahat gözlemlenmesi mevcuttur.

Üçüncü soru, planlayıcının geçmişteki hava raporlarına dayanarak, yük bileşenlerinin tahmin edilmesi esasına dayanır. Bu yöntemde, hava değişimlerini düzenli bir seyir içermediği için bazı düzeltmelerin yapılması zorunlu hale gelmektedir. Dördüncü soru, tahmin yaparken detaylı ve kesin matematiksel hesaplamalar yapılması gerekmektedir. Matematiksel yöntem yükün yapısına göre belirlenir. Belirli bir yöntem seçiminden önce mümkün olan tüm yöntemlerin denenip en uygun olanının tespit edilmesi gerekir [1].

## 2.2 Yük Tahmini Yöntemleri

İleriye dönük yük taleplerinin belirlenmesinde, kullanılacak tahmin tekniğinin seçimi önemlidir. Yük değişimlerinin yapısına bağlı olarak bir yöntem diğer yöntemlere göre üstünlük gösterebilir. Özel bir yöntemi seçmeden önce, yükün davranışını incelemek gereklidir. Yükün davranışından uygun bir eğrinin mi, yoksa stokastik bir modelin mi seçilmesinin uygun olduğu anlaşılabilir. Elektrik şebekeleri birbirinden farklı özellikler gösterdiğinden mevcut sistemin yapısı da incelenmelidir. İncelenen sisteme göre en uygun tekniği seçmek için değişik sistemlerin avantaj ve dezavantajlarının bilinmesi önemlidir. Temelde ekstrapolasyon ve korelasyon olmak üzere iki tahmin yöntemi vardır. Ekstrapolasyon, geçmiş verilerin ve bu verileri etkileyen güçlerin geçmişte olduğu gibi gelecekte de aynı oranda artacağı varsayılarak yapılan tahmindir. Bir çok ekstrapolasyon yöntemi vardır. Bunların bazıları matematiksel büyüme eğrilerinin yorumlanmasından oluşur. Diğerleri ise geçmiş yıllardaki büyüme ortalamalarının ileri yıllar için kullanılmasıdır. Korelasyon, yüklerin diğer faktörlere bağlanmasıyla gerçekleşen tahmindir. Örneğin hava koşulları veya ekonomik durum gibi. Korelasyonun en önemli avantajı büyümeyi etkileyen faktörleri önemlerine göre değerlendirmesidir. Örneğin hava koşulları ve yük arasındaki ilişkinin sayısallaştırılmasıdır. Korelasyon yöntemi aynı zamanda tahminlerin gerçek değerlerden sapması durumunda sebebin belirlenmesinde yardımcıdır.

Kullanılan tahmin yöntemlerinden bazıları şunlardır:

- En küçük kareler yöntemi (EKKY) ve regresyon analizi
- Zaman serisi analizi
- Box Jenkins modelleri ve türevleri
- Yapay sinir ağları
- Bulanık mantık
- Kalman süzgeci
- Bayesyen çıkarılma
- Kendi kendini düzenleyen haritalar



- Dalgacık dönüşümleri
- Fourier serileri
- Parçacık sürü optimizasyonu
- Hibrit modeller
- Diğer yöntemler

**EKKY ve regresyon:** Yük tahmini analizi zamana bağlı bir fonksiyona bağlı olmakla beraber, elektrik enerjisinin gelişimi için, ekonomik, sosyal, teknik gelişmeler ve çevre koşulları da incelenebilir. Bu değişkenlerle elektrik enerjisi arasında ilişki regresyon analizi ile belirlenebilir. Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki bağıntıyı kurar ve katsayıların değerlerinin araştırır. Bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişki doğrusal üssel logaritmik parabolik şekillerde kurulabilir. Bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki regresyon ile kurulan bağıntının katsayılarının belirlenmede en çok EKKY kullanılır. X ile gösterilen bir bağımsız değişkenin, gözlenen  $x_1, x_2, \dots, x_n$  gibi değerlerine, y değişkeninin  $y_1, y_2, \dots, y_n$  değerleri karşılık gelmiş olsun. Bu değerler dağılma diyagramında n tane nokta belirler. Bu noktalardan bir regresyon doğrusu ya da eğrisi geçirilecektir. Bağımlı değerlerle bağımsız değerler arasındaki ilişkiyi belirleyen fonksiyonun, dağılma diyagramında n tane nokta için, ordinatlar arasındaki farkların kareleri toplamı minimum olacak şekilde belirlenmelidir. Bu işlem matematiksel olarak şöyle ifade edilir:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}_i]^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (2.1)$$

Regresyon analizi ile bir değişkenin başka bir veya birkaç değişken karşısında gösterdiği farklı durumlar, sürekli bir fonksiyon halinde belirtilmektedir. Bu şekilde,

- İncelenen değişkenler arasında bulunduğu sanılan ilişkinin varlığı, yönü, biçimi ve standart sapması saptanmaktadır.
- Gözlenmesi ve ölçülmesi güç olan bir değişkenin belirli koşullardaki değeri, diğer değişkenler yardımıyla tahmin edilebilmektedir.

Değişkenler arasındaki ilişki ne kadar kuvvetli ise, regresyon denklemi ile yapılacak tahminlerin hatası o kadar küçülecek, ilişki zayıfladıkça tahminlerin hata payı büyüyecektir. Alfares ve Nazaeruddinn, tepe yük değerinin tahmini için regresyon yöntemini kullanmıştır [5].

**Zaman serileri analizi:** Aynı değişkenin belirli bir zaman dönemi içerisindeki gözlem sonuçlarını gösteren serileridir. Zaman serileri istatistik verilerinin oluş zamanları esas alınarak sıralanmasıyla elde edilen serilerdir. Zaman serileri bir olayın zaman boyunca aldığı farklı değerlerin bir araya getirilmesi ile oluşur. Zaman serilerinin analizinde gözlemler geçmişe ait verilerden oluşur, belirli bir zamandaki gözlemlerin değerleri ile ilgilenir ve genellikle analizler için eşit zaman aralıkları ele alınır (yıllık, aylık günlük,..), serideki dalgalanmalar sadece tesadüfi etkenlerden ileri gelmemektedir.

**Box Jenkins modelleri ve türevleri:** Bu sınıfa giren modeller veya genel tanımıyla birleştirilmiş, bütünlenen otoregresif-hareketli ortalama (ARIMA), zaman serilerinin modelleştirilmesinde kullanılan diğer yöntemlere göre daha kapsamlı ve genel bir tahmin modelidir. Zaman serisi analizlerinde tahmin ve denetim amacı ile kullanılan Box-Jenkins tahmin yöntemleri karmaşıktır. Yöntem çeşitli koşullarda elde edilen süreksiz zaman serileri ve dinamik sistemler için modeller kullanılmasında kolaylıklar ve yararlar sağlamaktadır. Box ve Jenkins birbirini tamamlayan beş aşamadan geçerek tahmin modellerinin kurulmasını önermektedirler. İlk aşamada, araştırmacı kuramsal bilgileri ve uygulamalı çalışmalardan elde edilen bulguları kullanarak amaca yönelik genel modeller ortaya koyar. Bundan sonraki aşamalar; belirleme, parametre tahminleri, uygunluk testleri ve öngörü olarak sıralanmaktadır. Belirleme aşamasında verinin özelliklerinin incelenmesinden elde edilecek bilgilere dayanarak genel modellerden uygun olabilecekler seçilir. Belirleme aşamasında seçilen modellerin mutlaka uygun modeller olacağı düşünülmemelidir. Tahmin aşamasında, belirlenen modelin katsayıları en etkin istatistiksel yöntemlerle tahmin edilmeye çalışılır. Uygunluk testi aşamasında, belirlenmiş ve katsayıları tahmin edilmiş modelin veri setine mutlaka uygun olacağı garantisi yoktur. Bunun için bu modele uygunluk testi uygulanır. Bu gibi testler belirlenmiş modelin hangi yönde aksadığını gösterir ve daha uygun modellerin seçilmesi için de bazı ipucu verir. Test başarılı bir sonuç ortaya koymamışsa, belirleme aşamasına göre dönülerek, yeni uygun bir

diğer modelin belirlenmesi gerekir. Otoregresif (AR), hareketli ortalama (MA), otoregresif-ortalama (ARMA) ve ARIMA, Box-Jenkins tahmin modelleridir. AR, MA ve ARMA modelleri durağan süreçlere uygulanır, ARIMA modelleri durağan olmayan süreçler için kullanılır. Aşağıda, AR modelleri örnek olarak kısaca anlatılmıştır.

*AR modelleri:* AR modelleri, yalnızca çıkış değerlerinin yardımıyla sistemin modellenmesi istenilen ayrık zamanlı sistemlerde kullanılabilir. Uyarlanabilir tahmin yöntemlerinde genel olarak her ötelemede tahmin edilen parametrelerin önceki değerleri kullanılarak modelleme hatasını en az yapacak şekilde yakınsaması göz önüne alınmıştır. AR yönteminin derecesi  $p$  ile ifade edilir ve AR( $p$ ) olarak gösterilebilir. Bu ifade aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$y[n + 1] = \sum_{k=0}^{p-1} a_k y[n - k] + \epsilon_{n+1} \quad (2.2)$$

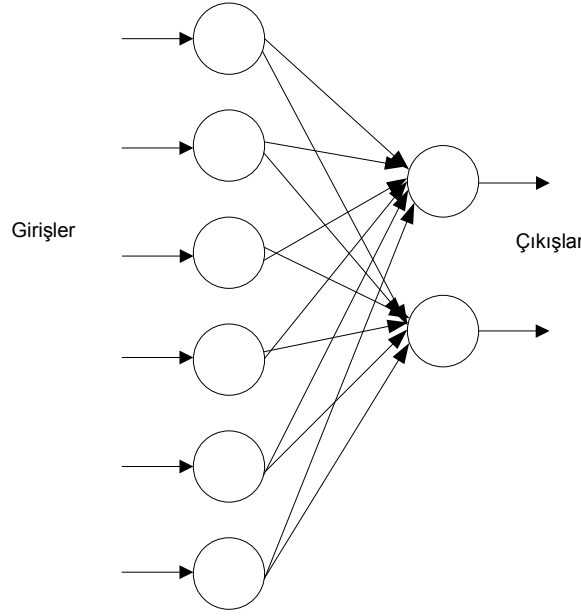
bu eşitlikte  $a_1, a_2, \dots, a_k$  sabit katsayıları göstermektedir.  $\epsilon_t$  bağımsız dizilimde rasgele değişkenleri göstermektedir. Bu değişkenin ortalama (mean) değeri sıfır ve değişinti (varyans) değeri  $\sigma^2$  'dir. Bir önceki gözlem değeri AR(1) olarak şu şekilde gösterilir:

$$y[n + 1] = a_k y[n] + \epsilon_{n+1} \quad (2.3)$$

Hagan ve Beher, kısa dönem yük tahmini analizi için zaman serileri yaklaşımını kullanmışlardır [7]. Cho ve arkadaşları, ARIMA modelini kullanarak kısa dönem yük tahmini analizi yapmışlardır [8]. Amjady, kısa dönem yük tahmininde tepe yük değerlerini bulmak için zaman serileri analizini kullanmıştır [9]. Abdel-Aal ve Al-Garni aylık yük talebini bulmak için, Wills ve Tram, uzun dönem için yük talebini bulmak amacıyla zaman serileri analizini kullanmıştır [10–11]. Meslier, kısa dönem yük tahmini analizi için Box ve Jenkins yaklaşımını kullanmıştır [6].

**YSA:** YSA, girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki herhangi bir ön bilgiye ihtiyaç duymadan, herhangi bir varsayımda bulunmadan, doğrusal olmayan modellemeyi sağlayabilmektedir [96]. Ağa, girdi bilgileri ve bu girdilere karşılık gelen çıktı bilgileri verilmekte ve ağın girdi-çıkıtı arasındaki ilişkiyi öğrenmesi sağlanmakta, böylece ağın eğitimi gerçekleştirilmektedir. Literatürde kullanılan birçok YSA yapısı bulunmaktadır. Çok katlı perseptronlar, pek çok alana uygulanmış olan bir ağ çeşididir.

Şekil 2.1’de örnek olarak 6 girişli-2 çıkışlı bir YSA yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1: 6 girişli-2 çıkışlı YSA yapısı

Öğreticili öğrenme olarak adlandırılan bu yöntem genelde tercih edilen bir yöntemdir [97]. Kısa dönem yük tahmini analizi problemini, Park, Papalexopoulos, Khotanzad, Kandil, Mandal, Topalli, Yalcinoz ve Santos ve arkadaşları YSA kullanarak çözmüşlerdir [13–22]. Bakirtzis ve arkadaşları Yunanistan’ın güç sistemine ait verileri kullanarak kısa dönem yük tahmini analizini YSA ile yapmışlardır [23]. İslam ve arkadaşları, orta dönem yük tahmini analizi için YSA’yı kullanmışlardır [31]. Carpinteiro ve arkadaşları, uzun dönem yük tahmini analizini hiyerarşal YSA yaklaşımını kullanarak yapmışlardır [33].

**Bulanık mantık:** Bulanık sistem yaklaşımları yük tahmininde sıcaklık, gün tipi gibi yük değişim faktörleri içeren günlere ait yükün tahmin edilmesinde iyi sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte YSA ve bulanık mantık tekniklerinin beraber kullanımı ile daha etkin sistemler tasarımılamak mümkündür. Kiartzis ve arkadaşları, Yunanistan güç sisteminde tepe yük değerini belirlemek amacıyla bulanık mantık yöntemini kullanmıştır [23]. Bulanık mantık yöntemi 3.4.1 bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır.

**Kalman süzgeci:** Dinamik bir sistemde modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumları tahmin edilebilen filtredir. Girgis ve arkadaşları, sistem yükünün tahmini için Kalman süzgecini kullanmışlardır [12].

**Bayesyen çıkarsama:** Bu yöntem istatistiksel bir yaklaşımdır ve Bayes teo-

remine dayandırılarak yapılandırılmıştır. Bu yaklaşımda model için hangi ön dağılımın kullanılacağı önemlidir. Saini, YSA tabanında Bayesyen çıkarsama yöntemini kullanarak tepe yük değerlerini tahmin etmiştir [25]. Lauret ve arkadaşları, kısa dönem yük tahmini analizi için bu yaklaşımı kullanmışlardır [26].

**Kendi kendini düzenleyen haritalar:** Bu yöntem, eğitici olmayan durumda giriş sinyallerinin analizi ve kodlanması için otomatik bir yöntemden oluşan YSA'dır. Bu algoritma, beyinde bulunan haritalara benzer. Amin Nesari ve arkadaşları, tepe yük değerinin tahmini için bu yöntemi kullanmışlardır [27].

**Dalgacık dönüşümleri:** Bu yöntem, Fourier dönüşümünün durağan olmayan sinyallerdeki eksiklerini gidermek amacıyla geliştirilen farklı bir dönüşüm yöntemidir. Dalgacık, ortalama değeri sıfır olan ve zamanla sınırlı olan bir dalga şeklindedir. Zaman ekseninde kaydırma ve ölçekleme parametreleri dalgacıkların temelini oluşturmaktadır. FS'nin temel fonksiyonları sinüs ve kosinüs ifadelerinden meydana gelir. Dalgacık dönüşümlerinde ise çok sayıda dalgacık fonksiyonları vardır. Bu dönüşüm farklı uzunluktaki bölgeleri kapsayan pencereleri içeren bir tekniktir. Tai ve arkadaşları, kısa dönem yük tahmini analizi için bu yöntemi kullanmışlardır [28]. Yao ve arkadaşları YSA ve dalgacık dönüşümü yöntemini birlikte kullanarak kısa dönem yük tahmini analizi yapmışlardır [29].

**Fourier serileri:** FS, periyodik bir fonksiyonu basit dalgalı fonksiyonların (sinüs ve kosinüs) toplamına çevirir. González-Romera ve arkadaşları YSA ve FS birlikte kullanarak yük tahmini yapmışlardır [32].

**Parçacık sürü optimizasyonu:** Bu yöntem, çok boyutlu bir arama uzayında sürü parçacıklarının arama davranışına dayalı bir yöntemdir. Parçacık hareket ettiğinde, koordinatlarını bir fonksiyona gönderir ve parçacığın uygunluk değeri ölçülür. El-Telbany ve El-Karmi, kısa dönem yük tahmini analizi için bu yöntemi uygulamışlardır [30].

**Hibrit modeller:** Yük tahmini analizi için çeşitli hibrit yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bakirtzis ve arkadaşları, yük tahmini analizi için bulanık mantık ve YSA'nın birlikte kullanıldığı bir yaklaşım sunmuşlardır [23]. Kurban ve Başaran Filik, ertesi gün yük-tahmini analizi için YSA ve zaman serilerinin birlikte kullanıldığı bir yaklaşım sunmuşlardır [24].

Literatürde farklı yöntemlerle karşılaşmak da mümkündür.

### 3. BİRİM YÜKLENME PROBLEMİ VE ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Bu bölümün ilk kısmında, birim yüklenme problemi amaç fonksiyonları ve kısıtları verilerek tanımlanmıştır. İkinci kısmında, birim yüklenme probleminin çözümünde literatürde kullanılan yöntemler hakkında kısca bilgiler verilmiştir. Üçüncü kısmında, birim yüklenme probleminin çözümü için bu tez çalışmasında kullanılan gevşetilmiş Lagrange ve ceza fonksiyonları ve literatürde ilk defa birim yüklenme problemine uygulaması yapılan genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, MSG ve F-MSG matematiksel yaklaşımları ve bu problemin çözümünde kullanımı anlatılmıştır. Son kısmında ise, birim yüklenme probleminin çözümü için kullanılan akıllı sezgisel yaklaşımlardan bulanık mantık ve benzetimli tavlama yöntemleri ve bu problemin çözümüne uygulanması detaylı olarak sunulmuştur.

#### 3.1 Birim Yüklenme Problemi

Birim yüklenme problemi ile üretim birimleri arasında hangi birimin serviste ne kadar süre ve periyotta kalacağı belirlenir. Bu problemin amacı, minimum maliyetle talep edilen gücün belirlenen kısıtlar altında karşılanmasıdır. Birim yüklenme problemi, doğrusal olmayan, karma tamsayılı, dışbükey olmayan karmaşık bir optimizasyon problemidir ve literatürde doğrusal olmayan programlama-zor olarak adlandırılmaktadır. Bu problemin amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıdaki şekildedir [2-3]:

**Amaç fonksiyonu:**

$$\text{Min TM} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_i(t) \times OC_i[P_i(t)] + BM_i(t) \times (1 - u_i(t - 1))] + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N KPM_i(t) \times (1 - u_i(t - 1)) \quad (3.1)$$

(3.1) denkleminde TM, maliyet değerini, T, periyot değerini, N, birim sayısını,  $u_i(t)$ , birimin devrede olup olmadığını,  $OC_i$ , i. birimin maliyet fonksiyonunu,  $P_i(t)$ , i. birimin t. zamanda çıkış gücünü,  $BM_i$ , i. birimin başlangıç maliyetini (BM),  $KPM_i(t)$ , i. birimin kapanma maliyetini (KPM) göstermektedir.

Bu problemin çözümü için (3.1) denkleminde bulunan  $P_i(t)$  ve  $u_i(t)$  değerlerini aşağıdaki kısıtları sağlayacak şekilde bulunması gerekmektedir. Prob-

lemin çözümündeki esas zorluk  $u_i(t)$  ifadesinden kaynaklanmaktadır.  $u_i(t)$  yalnız '1' ve '0' değerlerini alabilmektedir.

**Sistem kısıtları:**

- Yük dengesi kısıtı: Sistemde tahmin edilen yük değeri, birimlerin çıkış güçlerinin toplamına eşit olmalıdır:

$$\sum_{i=1}^N u_i(t) \times P_i(t) = P_d(t) \quad (3.2)$$

(3.2) denkleminde,  $P_d(t)$ ,  $t$ . zamanda talep edilen yük değerini göstermektedir.

- Dönme rezervi kısıtı: Sistemin güvenilirliği için yeterli dönme rezervi olması gerekmektedir.

$$P_d(t) + P_r(t) - \sum_{i=1}^N P_{i,maks} u_i(t) \leq 0 \quad (3.3)$$

(3.3) denkleminde,  $P_r(t)$ ,  $i$ . birimin dönme rezervini göstermektedir.

**Birim kısıtları:**

- Üretim yük kapasitesi kısıtları (ÜYK): Her bir birim üretim limit değerlerini sağlamalıdır.

$$u_i(t) P_{i,min} \leq P_i(t) \leq u_i(t) P_{i,maks} \quad (3.4)$$

(3.4) denkleminde  $P_{i,min}$ ,  $i$ .birimin minimum çıkış gücü değerini,  $P_{i,maks}$ ,  $i$ .birimin maksimum çıkış gücü değerini göstermektedir.

- En küçük devreye giriş ve çıkış süresi ( $T_i^{up}$ ,  $T_i^{down}$ ): Birim devreye girdiğinde  $T_i^{up}$ 'dan önce devreden çıkarılamaz. Benzer şekilde, birim devreye alındığı zaman,  $T_i^{down}$  kadar süre devrede kalmalıdır.

$$u_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } T_{i,on}^t \leq T_i^{up} \\ 0 & \text{eğer } T_{i,off}^t \leq T_i^{down} \\ 0 \text{ veya } 1 & \text{eğer diğer durumlarda} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$T_{i,on}^t = \begin{cases} T_{i,on}^t + 1, & \text{eğer } u_i(t) = 1 \\ 0 & \text{eğer } u_i(t) = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$T_{i,off}^t = \begin{cases} T_{i,off}^t + 1, & \text{eğer } u_i(t) = 0 \\ 0 & \text{eğer } u_i(t) = 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

Bu eşitliklerde,  $T_{i,off}^t$ , i. birimin sürekli kapalı olduğu süreyi,  $T_{i,on}^t$ , i. birimin sürekli devrede olduğu süreyi göstermektedir.

- Rampa limitleri oranı kısıtı: Bu kısıt, birimlerin çıkış gücünün bir saat içinde ne kadar artabileceğini veya azalabileceğini belirler.

$$P_i(t) - P_i(t-1) \leq RU_i, \text{ eğer } u_i(t) = 1 \& u_i(t-1) = 1 \quad (3.8)$$

$$P_i(t-1) - P_i(t) \leq RD_i, \text{ eğer } u_i(t) = 1 \& u_i(t-1) = 1 \quad (3.9)$$

(3.8) denkleminde  $RU_i$ , rampa yukarı oranını, (3.9) denkleminde  $RD_i$ , rampa aşağı oranını göstermektedir.

- Başlangıç maliyeti:

$$BM_i^t = \begin{cases} BM(\text{Sıcak}), & \text{eğer } T_{i,down} \leq T_{i,off} \leq T_{i,down} + T_{i,cold} \\ BM(\text{Soğuk}), & \text{eğer } T_{i,off} > T_{i,down} + T_{i,cold} \end{cases} \quad (3.10)$$

(3.10) eşitliğinde  $T_{i,cold}$ , i. birimin soğuma başlangıç süresini göstermektedir.

- Kapanma maliyetleri.

Birim yüklenme problemi, birimlerin devrede olup olmama durumuna göre 1 veya 0 değerlerini almaktadır. Böylece,  $u_i(t)$  değişkeninin 1 veya 0 değerini almasına bağlı olarak problem süreksiz ve amaç fonksiyonu dışbükey olmayan bir yapıya dönüşebilmektedir.  $u_i(t)$  değişkeninin 0 olduğu durumda problem, süreksiz bir fonksiyon olmaktadır. Benzer şekilde,  $u_i(t)$  ifadesinin kısıt fonksiyonları denklemlerinde bulunması, problemin kısıtlarının da dışbükey olmadığını göstermektedir [2].

### 3.2 Birim Yüklenme Probleminin Çözümünde Literatürde Kullanılan Yöntemler

Birim yüklenme, doğrusal olmayan, karma tamsayılı, dışbükey olmayan bir problem olduğundan dolayı optimum çözümünü bulmak için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu bölümde, öncelikle birim yüklenme probleminin çözümünde kullanılan yöntemlerin neler olduğu belirtilerek her biri için kısa açıklamalar yapılmıştır. Bu tez çalışmasında, gevşetilmiş Lagrange, bulanık mantık, benzetimli tavlama yöntemleri kullanıldığından bu yöntemlerle ilgili detaylı bilgi diğer bölümlerde verilmiştir. Kullanılan başlıca birim yüklenme yöntemleri şunlardır:



- Detaylı sıralama
- Öncelik listesi
- Dinamik programlama
- Tamsayı ve doğrusal programlama
- Dal ve sınır algoritması
- Gevşetilmiş Lagrange yöntemi
- İç nokta algoritması
- Tabu araştırma yöntemi
- Benzetimli tavlama
- Uzman sistemler
- Bulanık mantık
- YSA
- Genetik algoritma
- Evrimsel programlama
- Karınca koloni araştırma algoritması
- Hibrit modeller

**Detaylı sıralama:** Üretim birimleri arasında mümkün bütün kombinasyonları bulmak amacıyla bütün birimlerin sıralanmasıyla çözüm bulan bir yöntemdir. Bu yöntem, birim yüklenme probleminin çözümü için kullanılan ilk yöntemlerdendir. Fakat bu yöntem, büyük boyutlu sistemlerde çözüm bulmak için uygun değildir [37].

**Öncelik listesi:** En düşük işletme maliyetini bulmak amacıyla, üretim birimleri arasında öncelik düzenlemesi yapar. Belirlenen liste, talep edilen yük değeri karşılanıncaya kadar yeniden sıralanır. Burns ve Lee, birim yüklenme problemini bu yöntem kullanarak çözmüşlerdir [38]. Shoults ve arkadaşları öncelik listesi yöntemini kullanarak verimli bir algoritma geliştirmiştir [40].

**Dinamik programlama (DP):** Bu yöntem, sistem analizi alanında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve çok aşamalı karar verme problemlerinde kullanılabilir. Birim yüklenme probleminde periyotlar birbirine bağlıdır ve bir zaman döneminde alınan kararlar sonraki karar verme aşamalarını etkilemektedir. Problem, alt problemlere bölünür ve her bir alt problem için optimal bir çözüm bulunur, n sayıda karar verme aşamalarına sahip bir problem, n sayıda ve her biri tek bir karar değişkenine sahip problemlere bölünür. Hesaplama süresi, bir problem içindeki değişkenlerin sayısına bağlı üssel büyürken, alt problemlerin sayısına bağlı olarak doğrusal büyür. Problemin tümü bir sistem ve alt problemler de basamak olarak düşünülebilir. DP’da basamaklar, genellikle bir zaman aralığını temsil eder. Bir sistemin her bir basamağında, problemin çözüm aşamalarına karşılık gelen birden fazla durum vardır. Durumlar, tamamlanmamış çözümleri gösterir. Karar verici, her bir basamakta o basamak için, en iyi kararı vermelidir. Bir karar, sistemi bir durumdan diğerine taşır. Bir sistemi bir durumdan diğerine taşıyan her bir aşamaya basamak denir. DP genellikle ileri doğru ve geriye doğru dizilimler şeklinde uygulanır. Bu yöntem, güç sistemleri problemleri için önemli yöntemlerden biridir.

DP algoritması, başlangıç anından son zamana kadar uygulanır ve başlangıç anına döner. İleri dinamik programlama algoritmasının birim yüklenme probleminde bazı avantajları vardır. Başlangıç koşulları kolayca belirlenir ve gerekli olduğu kadar hesaplamalar yapılır.

Tekrarlanan algoritma K. saatte I.kombinasyon ile minimum maliyeti hesaplar.

$$F_{maliyet}(K, I) = \underbrace{\min}_L [P_{maliyet}(K, I) + S_{maliyet}(K - 1, L : K, I) + F_{maliyet}(K - 1, L)] \quad (3.11)$$

$F_{maliyet}(K, I) = (K, I)$ . duruma ulaşmak için en düşük toplam maliyet.

$P_{maliyet}(K, I) = (K, I)$ . durumun üretim maliyeti.

$S_{maliyet}(K - 1, L : K, I) = (K - 1, L)$ . durumdan (K,I). duruma ulaşmak için geçiş maliyeti.

(K,I). durum K. saatte I. kombinasyondur. İleri DP yaklaşımı için, geçiş stratejisi verilen bir durumdan ileri saatlerdeki durumlara kadar belirlenir [2].

Lowery, DP yönteminiyle birim yüklenme problemini çözmüştür [41].

**Tamsayı ve doğrusal programlama:** Tamsayılı programlama doğrusal programlamanın devamı olup doğrusal programlamada meydana gelebilecek gerçekçi olmayan sonuçları ortadan kaldırmayı amaçlar. Dillon ve arkadaşlarının planlama problemleri için, dal ve sınır yöntemini genişleterek geliştirdiği yöntemdir [43]. Birim yüklenme, doğrusal yapıda olmayan bir problemidir. Doğrusal programlama yöntemi, Dantzig-Wolfe ayrıştırma prensibi kullanılarak birim yüklenme problemine uygulanmıştır. Doğrusal programlamada simplex yöntemiyle çözüm bulunmuştur [44].

**Dal ve sınır algoritması:** Tamsayı ve karışık tamsayı programlama problemlerinin çözümünde kullanılır. Bu algoritmada, optimize edilecek olan değişken için öngörülen alt ve üst sınırlar, problem için uygun olan çözüm alanını oluşturur. Daha sonra, bu çözüm alanı kapsamında alt kümeler belirlenir. Uygun çözümü vermeyen alt kümeler elenir. Optimum çözüm bulununcaya kadar alt kümelere oluşturulmaya ve eleme yapılmaya devam edilir. Cohen ve arkadaşları, birim yüklenme probleminin çözümü için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir [46]. Bu yöntem öncelik sıralamasına gerek duymadan bütün zaman bağımlı kısıtları içine alır.

**Gevşetilmiş Lagrange yöntemi:** DP yöntemi büyük boyutlu güç sistemlerinin çözümünde bazı dezavantajlara sahiptir. Bunun nedeni, her bir periyotta kombinasyon sayılarının test edilmesidir. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi de temel olarak ikil optimizasyon yöntemine dayanır. Bu yöntem bu dezavantajları genel olarak çözebilmektedir. Optimizasyon problemlerini çözenin bir yolu da ikil çözüm olarak bilinir. Lagrange çarpanları da ikil değişkenler olarak adlandırılır. İkili optimizasyon yönteminin yakınsaması, asıl ve ikil problem çözümleri arasındaki boşluk değerine bakılarak ölçülür. Problem, dışbükey olmayan bir yapıda olduğu için asıl ve ikil değerler birbirine eşit olmayacaktır. Lagrange yöntemi ile problemin çözümünü önemli oranda Lagrange çarpanlarına bağlıdır. Bu nedenle, başlangıç Lagrange çarpanları ve çarpanların güncellenmesi bu yöntemle problemin çözümü için oldukça önemlidir.

Lagrange yöntemi, talep edilen yük değeri, dönme rezervi gibi kısıtları sağlaması açısından ve büyük sistemlere uygulanabilirliği açısından birim yüklenme problemi için uygundur. Bu nedenle, Lagrange yöntemi bu problemin çözümünde en çok kullanılan yöntemlerdendir. Literatürde kullanılan iki

Lagrange yöntemi yaklaşımı vardır. Bunlardan biri, klasik Lagrange yöntemi diğeri ise genişletilmiş Lagrange yöntemidir [47]. İkili optimizasyon probleminin yakınsamasında, ikinci derece ceza terimleri kullanılarak problem çözülmüştür.

Merlin, gevşetilmiş Lagrange ile problemin çözümü için yeni bir yöntem kullanmıştır [48]. Aoki, büyük ölçekli birim yüklenme problemi için gevşetilmiş Lagrange yöntemini kullanmıştır [49]. Yeni bir gevşetilmiş Lagrange yöntemi birim yüklenme probleminin çözümü için Zhuang tarafından önerilmiştir [50]. Zhuang tarafından yapılan çalışmanın ilk kısmında, birim yüklenme problemi standart subgradient yöntemi kullanılarak maksimumlaştırılmıştır. İkinci kısmında, ikili uygun çözüm aranmıştır. Üçüncü kısmını ise, ekonomik dağıtım izlemektedir.

Wang ve arkadaşları, rampa oranları limitlerini de probleminin çözümüne dahil etmiştir [51]. Takriti gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile birim yüklenme problemini çözmüştür [52]. Li ve Shahidehpour birim yüklenme probleminde karma tamsayılı programlama ile gevşetilmiş Lagrange yöntemini karşılaştırmıştır [53]. Zhai ve arkadaşları, ideal birimler için ardışık alt problem yöntemini birim yüklenme probleminin çözümüne uygulamışlardır [54]. Ongsakul ve Petcharaks, geliştirilmiş uyarlanabilir Lagrange yöntemini birim yüklenme problemine uygulamışlardır [55]. Seki ve arkadaşları, Lagrange yöntemine dayalı yeni bir yerel arama yöntemini kullanarak birim yüklenme problemini çözmüştür [56].

**İç nokta algoritması:** Bu yöntem 1984'te Karmarkar tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem uygun bölge içerisindeki bir noktadan başlar ve her bir adımda uygun bölgenin iç noktalarında var olan daha iyi bir çözüme gidilerek optimal çözüme ulaşmaya çalışılır. Madrigal ve arkadaşları, iç nokta algoritmasını birim yüklenme problemine uygulamıştır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri yakınsama karakteristiğidir [57].

**Tabu arama yöntemi:** Temel olarak belirli bir problem için bulunan ilk çözüm etrafındaki komşuluktan oluşur. Bu yöntem optimum çözümü elde etmek için çözüm uzayını hareket mekanizmasıyla araştıran ve yapay hafıza özelliği ile önceki durumları üretmeyerek yerel optimumlardan kurtulan bir arama yöntemidir. Bu yöntemin en önemli özelliklerinden biri, mevcut çözümü aday komşu çözümler ile karşılaştırıldıktan sonra bir sıralama ve karşılaştırma işlemi yapması sonucunda kendini yenileyebilmesidir. Mori ve arkadaşları birim yüklenme problemi için tabu arama yöntemini kullanmıştır [58–59]. Lin ve

arkadaşları, ilerlemiş bir tabu optimizasyon yöntemi kullanarak ekonomik dağıtım problemlerini çözmüştür [60]. Mantawy ve arkadaşları yeni tabu arama yöntemini uzun dönem hidrolik santrallerin dağıtımına uygulamıştır [61].

**Benzetimli tavlama:** Bu algoritma, katıların belirli bir başlangıç sıcaklığından başlayarak yavaş yavaş soğutulduğu tavlama sürecinin benzetimi olan tesadüfî değişkenlerin kullanıldığı (stokastik) bir arama algoritmasıdır. Kirkpatrick, Gerlatt ve Vecchi (1983) ve Cerny (1985) tarafından önerilmiştir. Tavlama, ısı banyosundaki bir katının yüksek enerji durumlarından başlayarak daha düşük enerji durumlarının elde edilme sürecini göstermektedir. Katılar düşük enerjili durumda, yani düşük sıcaklıkta daha karardır. Yani katıların parçacıkları düşük sıcaklıklarda daha düzenlidir. Bundan dolayı, katının parçacıkları kendini düzenleyene kadar ısı banyosunun sıcaklığının giderek azaltılır. Katının sıvı durumunda tüm parçacıkları geliş güzel hareket ederler. Katı durumunda ise bir kafes şeklinde düzenlenirler. Bu durumda sistemin enerjisi en azdır ve bu duruma yer durumu denmektedir. Bir katının yer durumu, sıcaklık yeteri kadar yükseltilmiş ve soğutmada yeteri kadar yavaş yapılmışsa elde edilir. Aksi halde katının bulunduğu durum yarı kararlı bir durumdur. Katının farklı fiziksel durumları problemdeki mümkün çözümlere, sistemin enerjisi amaç fonksiyonuna, bir durumun enerjisi bir çözümün amaç fonksiyonu değerine, yarı kararlı durum yerel en iyi çözüme, yer durumu genel en iyi çözüme karşılık gelir.

Katıların bu tavlama sürecinde geçirdiği durumları benzetebilmek için Metropolis tarafından 'Metropolis algoritması' geliştirilmiştir [62]. Benzetimli tavlama algoritmasının amacı, tüm mümkün çözüm noktalarının bir alt kümesinde (S) tanımlanmış bir  $f(x)$  fonksiyonunu eniyileyecek bir  $x$  çözümü bulmaktır. Bu algoritma rassal olarak seçilen bir başlangıç çözümüyle aramaya başlar. Bundan sonra uygun bir mekanizma ile bu çözüme komşu bir çözüm seçilir ve  $f(x)$ 'de meydana gelen değişim hesaplanır. Eğer değişim istenilen yönde ise komşu çözüm mevcut çözüm olarak alınır. Eğer istenen yönde bir değişim sağlanmamışsa, benzetimli tavlama algoritması bu çözümü 'Metropolis Kriteri' ile elde edilen olasılık değeri ile kabul eder. Amaç fonksiyonunda ters yönde bir değişim yaratan bir çözümün belli olasılık değeri ile kabulü, benzetimli tavlama algoritmasının yerel en iyi noktalardan kurtulmasını sağlamaktadır. Olasılık değerine göre T değeri yüksek olduğunda amaç fonksiyonunda meydana gelen artışların çoğu kabul edile-

cektir. T değeri azaldıkça kabul edilme oranı da azalacaktır. Bu nedenle benzetimli tavlama algoritmasında yerel noktalara takılmamak için başlangıç sıcaklık değeri yüksek seçilerek yavaş yavaş azaltma yoluna gidilmektedir.

Zhuang ve arkadaşları, Mantawy ve arkadaşları, bu algoritmayı birim yüklenme probleminin çözümünde uygulamıştır [63–64]. Bu yöntemin dezavantajlarından biri çözüme ulaşma süresinin uzun olmasıdır. Bu yöntem ile ilgili detaylı bilgi 3.4.2 bölümünde verilmiştir.

**Uzman sistemler:** Bu sistemler, yapay zeka sistemlerinden biridir. Bu yöntem, özel bir alandaki uzman bilgi gerektiren problemleri çözebilir ve bu bilgiyi saklayabilir. Bu nedenle bilgiye dayalı sistemler olarak adlandırılırlar. Uzman sistemler, problemi anlama, problemi çözmeye, çözümü açıklama, çözümü değerlendirme, bilgileri genişletme ve bilgilerin yapılandırılması kısımlarından oluşur. Mokhtari ve arkadaşları, üretim birimleri arasında yük paylaşımı için uzman sistemleri kullanmışlardır [65]. Ouyang ve arkadaşları, birim yüklenme problemini uzman sistem yöntemini kullanarak çözmüşlerdir [66]. Salam ve arkadaşları, birim yüklenme probleminde uygun çözüm bulmak için DP tabanlı uzman sistemleri kullanmışlardır [67].

**Bulanık mantık:** Bu yöntem bulanık küme ve alt kümelere dayanır. Klasik yaklaşımda bir varlık ya kümenin elemanıdır ya da değildir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde varlık küme ile olan üyelik ilişkisi bakımından kümenin elemanı olduğunda “1”, kümenin elemanı olmadığı zaman “0” değerini alır. Bulanık mantık da her bir varlığın üyelik derecesi vardır. Saneifard ve arkadaşları, bulanık mantık yöntemini yük dengesi, başlangıç maliyeti kısıtlarından oluşan birim yüklenme probleminde uygulamışlardır [68]. Saadawi ve arkadaşları otuzsekiz birimden oluşan bir sistemin çözümünde bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır [69]. Bu yöntem ile ilgili detaylı bilgi 3.4.1 bölümünde verilmiştir.

**YSA:** Biyolojik sinir sisteminin çalışma şekline benzetilerek bulunmuştur. Sinir hücreleri nöronlar içerirler ve bu nöronlar da çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanır ve ağı oluşturur. Bu ağlar ile öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarılır.

Sasaki ve arkadaşları, kombinasyonel optimizasyon problemi için Hopfield sinir ağlarını birim yüklenme probleminde uygulamışlardır [70]. Amaçlanan yöntem, otuz birimden oluşan sisteme yirmi dört periyot için uygulanmıştır. Wang

ve arkadaşları, rampa oranı kısıtlarını da probleme dâhil ederek birim yüklenme problemini YSA ile çözmüşlerdir [71]. Walsh ve arkadaşları ekonomik dağıtım ve birim yüklenme problemi için geliştirilmiş sinir ağları yapılarını kullanmışlardır [72]. Liang ve arkadaşları genişletilmiş YSA yaklaşımını başarılı bir şekilde birim yüklenme problemine uygulamışlardır [73].

**Genetik algoritmalar (GA):** GA, karmaşık ve büyük boyutlu problemlerin çözümünde kullanılır. Bu problemler, olasılıklı algoritmalar sınıfına ait olmakla birlikte rastgele algoritmalarından çok farklıdır. Bu yöntem yapay zekânın bir kolu olan evrimsel hesaplama tekniğinin bir parçasını oluşturmaktadır. GA, geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkânsız olan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Algoritma, ilk olarak ana yığın (popülasyon) diye tabir edilen bir çözüm (kromozomlarla ifade edilir) kümesi ile başlatılır. Bir ana yığından alınan sonuçlar bir öncekinden daha iyi olacağı beklenen yeni bir ana yığın oluşturmak için kullanılır. Yeni ana yığın oluşturulması için seçilen çözümler uyumluluklarına göre seçilir. Çünkü uyumlu olanların daha iyi sonuçlar üretmesi olasıdır. Bu, istenen çözüm sağlanıncaya kadar devam ettirilir. GA'da, algoritmanın ne zaman sonlanacağına kullanıcı karar vermektedir. GA'nın belli bir sonlanma ölçütü yoktur. Sonucun yeterince iyi olması veya yakınsamanın sağlanması, algoritmanın durması için ölçüt olarak kullanılabilir.

Son yıllarda GA yöntemi başarılı bir şekilde optimizasyon problemlerine uygulanmıştır. Gil ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, GA yöntemi kısa dönem hidrotermik dağıtım problemine uygulanmıştır [74]. Zoumas ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, hidrotermik problem iki alt probleme indirgeyerek GA yöntemi ile çözülmüş ve sistemin minimum maliyetle yüklenmesi sağlanmıştır. GA, Yunanistan'ın güç sistemine (onüç hidrolik ve yirmisekiz termik santralden oluşan) uygulanmıştır [75]. Rudolf ve arkadaşları, farklı GA parametreleri ile hidrotermal güç sistemi için birim yüklenme problemini çözmüştür [76]. Swarup ve arkadaşları, kromozomların gösteriminde yeni bir gösterim kullanarak büyük ölçekli birim yüklenme problemi için GA'yı uygulamışlardır [77].

**Evrimsel programlama (EP):** GA'da üretim ve seçim yöntemi mutasyon ve genetik değişimken, EP'de mutasyon ve rekabettir. Uyar ve Türkay [78], Juste ve arkadaşları [79] evrimsel programlama yaklaşımını birim yüklenme problemine uygulamışlardır. Chen ve arkadaşları, geleneksel evrimsel programlamanın

genişletilmiş algoritması ile birim yüklenme problemini çözmüşlerdir [80].

**Karınca koloni araştırma algoritması:** Bu yöntem, karıncaların yuvaları ile besin kaynakları arasında izledikleri yolların izlenmesi sonucunda bulunmuştur. Karıncalar ile ilgili deneyler, Goss ve arkadaşları tarafından karınca kolonileri üzerinde yapılmıştır [98]. Sisworahardjo ve El-Kaib, karınca koloni araştırma algoritmasını birim yüklenme problemine uygulamışlardır [82]. Benzer şekilde Huang, hidroelektrik dağıtım problemi için bu algoritmayı kullanmıştır [83].

**Hibrit modeller:** Su ve arkadaşları, bulanık mantık ile DP yöntemini birlikte kullanarak birim yüklenme problemine uygulanmışlardır [84]. Benzer şekilde hibrit YSA ile DP yöntemi Ouyang ve arkadaşları tarafından bu probleme uygulanmıştır [85]. Tong ve Shahidehpour, doğrusal programlama ve gevşetilmiş Lagrange yönteminin birlikte kullanıldığı bir yaklaşım sunmuşlardır [86]. Mori ve arkadaşları öncelik listesini tabu arama tekniği ile birleştirerek çözüm sunmuştur [58]. Huang ve arkadaşları tarafından GA tabanlı YSA ve DP'nin birlikte kullanıldığı bir yaklaşım sunmuşlardır [92]. Mantawy ve arkadaşları GA, tabu arama ve benzetimli tavlama yöntemini birlikte kullanarak problemi yeni bir yaklaşımla çözmüşlerdir [88]. Padhy, uzman sistemler, bulanık mantık ve YSA'yı birlikte kullanarak birim yüklenme problemini çözmüştür [89]. Cheng ve arkadaşları, GA ve gevşetilmiş Lagrange yöntemini birim yüklenme probleminin çözümünde birlikte kullanmışlardır [90].

Literatürde farklı yöntemlerle karşılaşmak da mümkündür.

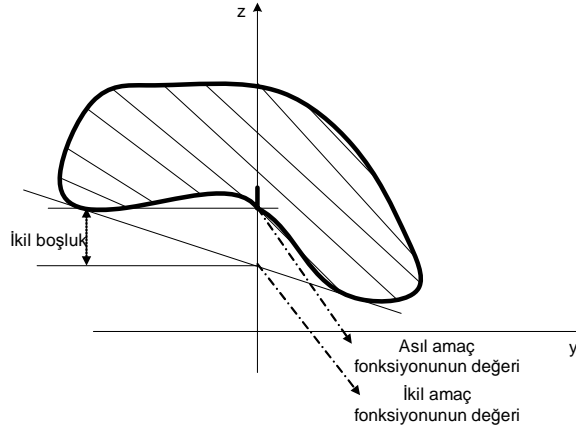
### 3.3 Birim Yüklenme Probleminin Çözümünde Kullanılan Matematiksel Yaklaşımlar

Birim yüklenme problemi için kullanılan matematiksel yaklaşımlar Lagrange temelinde çözüm yaklaşımı sunarlar. Lagrange yöntemi, eşitlik ve eşitsizlik kısıtları dahilinde problemi çözen bir optimizasyon yöntemidir. Lagrange tabanlı yöntemlerin en büyük dezavantajı dışbükey olmayan problemler için asıl ve ikil problemin çözümü arasında boşluk değeri olmasıdır. Bu kısımda, Lagrange temelinde çözüm yaklaşımı sunan beş farklı yöntem anlatılmıştır. Bu yöntemler, gevşetilmiş Lagrange, ceza fonksiyonları, genişletilmiş Lagrange ceza



çarpanları, MSG ve F-MSG'dir. Bu yöntemlerden genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, MSG ve F-MSG yöntemleri bu tez çalışmasında problemin çözümünü için ilk defa uygulanmıştır. MSG ve F-MSG doğrusal olmayan programlamazor olarak adlandırılan problemlerde ortaya çıkan ikil boşluğu ortadan kaldıran yöntemlerdir. Literatürdeki çalışmalarda, Lagrange tabanlı yöntemlerle probleminin çözümünde, sistemin boyutu artıka ikil boşluk değerin azaldığı görülmektedir [101]. MSG ve F-MSG yöntemlerinde ise sistem boyutundan bağımsız olarak ikil boşluk değeri sıfır olmaktadır [91–95,102–103].

İkil optimizasyon yönteminde çözüme yakınsanıp yakınsanmadığı, asıl ve ikil problem arasındaki boşluk kontrol edilerek anlaşılacaktır. Şekil 3.1'de asıl ve ikil problem arasındaki ikil boşluk görülmektedir [91].



Şekil 3.1: İkil optimizasyon teorisinin grafiksel gösterimi

Bir optimizasyon problemi aşağıdaki şekilde tanımlansın:

Asıl problem (P):

$$\text{Min} f(x) \quad (3.12)$$

$$\text{Sınırlar} : f_i(x) = 0, \quad i=1,2,3,\dots,m$$

$$x \in S, \quad S \subset R^n.$$

Probleme ait Lagrange fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$L(x, u) = f_0(x) + \sum_{i=1}^m k_i f_i(x) \quad (3.13)$$

$x \in S, \forall u$ . Bu problemin çözümü için ikil problem aşağıdaki şekilde tanımlanır:

İkil problem ( $P^*$ ):

$$\theta(u) = \min L(x, k) \quad (3.14)$$

$$\max \theta(k), k \geq 0 \quad (3.15)$$

Problemin çözümünde kullanılan matematiksel yöntemler incelenmiştir.

### 3.3.1 Gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi

Bu kısımda, gevşetilmiş Lagrange yönteminin basit bir optimizasyon problemi için çözümü örnek olarak sunulmuştur [2].

$$\text{Min} f(x_1, x_2) = 0.25x_1^2 + x_2^2 \quad (3.16)$$

Kısıt:

$$w(x_1, x_2) = 5 - x_1 - x_2 \quad (3.17)$$

Lagrange fonksiyonu:

$$L(x_1, x_2, \lambda) = 0.25x_1^2 + x_2^2 + \lambda(5 - x_1 - x_2) \quad (3.18)$$

İkil fonksiyon şu şekilde tanımlanır:

$$q(\lambda) = \underbrace{\min}_{x_1, x_2} L(x_1, x_2, \lambda) \quad (3.19)$$

İkil problem şöyledir:

$$q^*(\lambda) = \underbrace{\max}_{\lambda \geq 0} q(\lambda) \quad (3.20)$$

Problemin çözümü iki ayrı optimizasyon problemini içermektedir.  $x_1$  ve  $x_2$  için başlangıç değerine gerek vardır ve  $q(\lambda)$ 'yı maksimum yapan  $\lambda$  değeri bulunur. Bu  $\lambda$  değeri sabit alınarak  $L(x_1, x_2, \lambda)$  değerini en küçük yapacak şekilde  $x_1$  ve  $x_2$  değerleri bulunur. Bu işlem çözüm bulununcaya kadar devam eder [2].

Amaç fonksiyonun dışbükey olması durumunda, ikil çözümle asıl çözümün değeri aynıdır. Problem Lagrange çarpanları veya ikil değişkenlerin terimleri cinsinden açıklanırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$x_1 = 2\lambda, x_2 = \frac{\lambda}{2} \quad (3.21)$$

Lagrange fonksiyonunda orijinal problem değişkenlerinden  $q(\lambda)$  Şu Şekilde olur:

$$q(\lambda) = -\left(\frac{5}{4}\right)^2\lambda + 5\lambda \quad (3.22)$$

Problemin cözümü Şu Şekildedir:

$$\frac{dq(\lambda)}{d\lambda} = \left(\frac{5}{2}\right)\lambda - 5 \quad (3.23)$$

Buradan  $\lambda = 2$  bulunur. İkil değişkenin değeri  $q^*(\lambda) = 5$ . Asıl değişkenlerin değeri  $x_1 = 4$  ve  $x_2 = 4$  bulunur. Ekonomik dağıtım problemlerinde problem değişkenleri ihmal edilemez,  $\lambda$  değeri ayarlanarak başlangıç değerinden büyük değere taşınır. Bunu ayarlamamanın en kolay yolu gradient ayarlaması yapmaktır [2].

$$\lambda^1 = \lambda^0 + \left[ \frac{dq(\lambda)}{d\lambda} \right] \alpha \quad (3.24)$$

$\alpha$  değerinin ayarlanması önemlidir. İkil optimizasyon yönteminde asıl ve ikil cözüm arasında son cözümeye yakınlık ‘boşluk’ büyüklüğüne bağlı olarak belirlenir. Asıl optimizasyon problemini  $J^*$  olarak adlandırırsak  $J^*$  Şu Şekilde tanımlanır:

$$J^* = \text{Min}f(x_1, x_2) \quad (3.25)$$

Optimal cözümeye yakınlığı ölçmek açasından ‘bağlı ikil boşluk’ Şöyle tanımlanır:

$$\frac{J^* - q^*}{q^*} \quad (3.26)$$

Sürekli değişkenlerden oluşan dışbükey bir problem için ‘bağlı ikil boşluk’ değeri son ötelemeye sifıra eşit olur. Fakat sürekli olmayan değişkenler ile dışbükey olmayan problemler için ‘bağlı ikil boşluk’ değeri gerçekte hiçbir zaman sifıra eşit olmayacaktır.

Dışbükey problemlerde değişkenler sürekli dir. İkil fonksiyonun maksimumlaştırılması asıl fonksiyonun minimalleştirilmesi olarak cözüm verecektir. Bu kısımda dışbükey olmayan bir problem olan birim yüklenme problemi için ikil optimizasyon yaklaşımının nasıl uygulanacağı ačıklanacaktır. Birim yüklenme problemlerinde sınırlı değişkenler vardır 1 veya 0. Bu değişkenler problemi büyük oranda zorlaştırmaktadır. Gevşetilmiş Lagrange yöntemiyle örnek bir problem

üzerinde çözüm şu şekilde bulunabilir [2].

$$J(x_1, x_2, u_1, u_2) = (0.25x_1^2 + 15)u_1 + (0.255x_2^2 + 15)u_2 \quad (3.27)$$

Kısıtlar:

$$w = 5 - x_1u_1 - x_2u_2 \quad (3.28)$$

ve

$$0 \leq x_1 \leq 10 \quad (3.29)$$

$$0 \leq x_2 \leq 10 \quad (3.30)$$

$x_1$  ve  $x_2$  sürekli değişkenlerdir, ve:  $u_1 = 1$  veya 0,  $u_2 = 1$  veya 0.

Bu problemde iki fonksiyon vardır  $x_1$  ve  $x_2$ . Fonksiyonlar nümerik olarak yakındır ve aralarında az oranda fark vardır. Bu fonksiyonları her biri 1-0 değişkenleri ile çarpılır ve amaç fonksiyonu ile birleştirilmiştir. Yine  $x_1$  ve  $x_2$  değişkenleri de 1-0 değişkenleri ile birleştirilmiştir. Burada dört mümkün çözüm bulunmaktadır:

- $u_1 = 0$   $u_2 = 0$  ise eşitlik kısıtları sağlanmadığından problemin çözümü yoktur.
- $u_1 = 1$   $u_2 = 0$  ise  $x_1 = 5$  alınır amaç fonksiyonunun değeri 21.25 olarak bulunur.
- $u_1 = 0$   $u_2 = 1$  ise  $x_2 = 5$  alınır amaç fonksiyonunun değeri 21.375 olarak bulunur.
- $u_1 = 1$   $u_2 = 1$  ise Lagrange fonksiyonu yazılır:

$$L(x_1, x_2, \lambda) = (0.25x_1^2 + 15) + (0.255x_2^2 + 15) + \lambda(5 - x_1 - x_2) \quad (3.31)$$

Bu durumda optimum sonuç  $x_1 = 2.5248$  ve  $x_2 = 2.4752$  ve  $\lambda = 1.2642$  olarak bulunur. Amaç fonksiyonunun değeri de 33.1559'dur.

Bu işlemlerden sonra ikinci adımda problemin optimum değere sahip olduğu görülmektedir. Burada yapılan mümkün bütün kombinasyonları 1-0 değişkenleri ile numaralandırmak ve sürekli değişkenler ile optimize etmektir. Fazla sayıda 1 ve 0 değişkeni olduğu durumda olası kombinasyon sayısı da çok fazla olacaktır. Gevşetilmiş Lagrange fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$L(x_1, x_2, u_1, u_2, \lambda) = (0.25x_1^2 + 15)u_1 + (0.255x_2^2 + 15)u_2 + \lambda(5 - x_1 - x_2) \quad (3.32)$$

$q(\lambda)$  şu şekildedir:

$$q(\lambda) = \min L \quad (3.33)$$

$x_1, x_2, u_1, u_2$  limitler içinde ve 1-0 durumları önceki şekilde olmalıdır. İkili problem aşağıdaki şekilde bulunur:

$$q^*(\lambda) = \max q(\lambda) \quad (3.34)$$

Bu problem dışbükey olmayan bir problem olduğundan, dışbükey fonksiyonlar için bilenen ikili yaklaşımla çözümü bulunamaz. Bundan dolayı bu problemin çözümünde alternatif çözüm yöntemine gerek vardır. Problemin çözüm adımları şunlardır [2]:

**1. adım.**  $\lambda^t$  için bir değer atanır ve sabit alınır. Bu durumda Lagrange fonksiyonu şu şekilde olur:

$$(0.25x_1^2 + 15)u_1 + (0.255x_2^2 + 15)u_2 + \lambda^k(5 - x_1u_1 - x_2u_2) \quad (3.35)$$

$\lambda^t$  değeri sabittir. Eşitliği tekrar düzenlersek şu şekilde olur:

$$(0.25x_1^2 + 15 - x_1\lambda^k)u_1 + (0.255x_2^2 + 15 - x_2\lambda^k)u_2 + 5\lambda^k \quad (3.36)$$

$5\lambda^k$  terimi sabit olduğundan ihmal edilebilir. Burada minimizasyon iki terim üzerinde yapılmaktadır. Her biri 1 ve 0 değişkenleri ile çarpılmaktadır. Her bir terim ayrı ayrı en küçük değeri bulunup toplayınca tüm fonksiyonun en küçük değerini bulabiliriz.

İlk terimde  $u_1$  kısa süreliğine ihmal edilirse optimum değer şu şekilde bulunabilir:

$$\frac{d}{dx_1}(0.25x_1^2 + 15 - x_1\lambda^k) = 0 \quad (3.37)$$

$x_1$  limitler dâhilindeyse  $0.25x_1^2 + 15 - x_1$  teriminde bulunan  $x_1$  değeri yerine konur. Bulunan değer pozitif ise  $u_1 = 0$  alınır. Diğer durumda  $u_1 = 1$  alınır.

İkinci terim içinde benzer işlemler yapılır ve  $u_2$  belirlenir. Bu durumda alınan  $\lambda^k$ 'ya göre Lagrangianın en küçük değeri bulunur.

**2. adım.** Bu adımda  $x_1, x_2, u_1, u_2$ 'nin bulunduğu ve sabit olduğu kabul edilir. İkili fonksiyonun en büyük değerini verecek olan  $\lambda$  bulunur.

$q(\lambda)$  sınırsız olduğundan  $q(\lambda)$ 'yı ayarlayacak şekilde  $\lambda$  değeri belirlenir.

$$\nabla q = \frac{dq}{d\lambda} \quad (3.38)$$

$\frac{dq}{d\lambda}$  değeri hesaplanır.  $\lambda$  şu şekilde ayarlanır:

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \frac{dq}{d\lambda} \alpha \quad (3.39)$$

Bu problemdeki gerçek zorluk  $\lambda$ 'nın ayarlanmasıdır.  $\lambda$ 'nın artırılması  $\frac{dq}{d\lambda}$ 'nin pozitif ve negatif olması durumuna bağlıdır.

'Bağlı ikil boşluk', dışbükey problem çözümüne benzer şekilde tanımlanır (3.26).

Klasik olarak kullanılan bazı yöntemler, örneğin DP yöntemi, büyük boyutlu güç sistemlerinin çözümünde bazı dezavantajlara sahiptir. Bunun nedeni, her bir periyotta kombinasyon sayılarının test edilmesidir. Gevşetilmiş Lagrange yöntemi bu dezavantajları genel olarak çözebilmektedir. Bu yöntem temel olarak ikil optimizasyon yöntemine dayanır.  $u_i^t = 0$  ise t.periyotta i. birim devrede değil.  $u_i^t = 1$  ise t.periyotta i.birim devrede anlamına gelmektedir.

Birim yüklenme problemi için amaç fonksiyonu ve birkaç kısıt aşağıda tanımlanmıştır:

1) Yük kısıtı:

$$P_d^t - \sum_{i=1}^N P_i(t) \times u_i(t) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.40)$$

2) Birim Limitleri:

$$u_i^t P_i^{min} \leq P_i(t) \leq u_i^t P_i^{maks}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (3.41)$$

3) En küçük devreye giriş ve çıkış süresi.

4) Amaç fonksiyonu

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + BM_i^t] u_i^t = F(P_i^t, u_i^t) \quad (3.42)$$

Lagrange fonksiyonu aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$L(P, u, \lambda) = F(P_i^t, u_i^t) + \sum_{t=1}^T \lambda^t (P_d^t - \sum_{i=1}^N P_i^t \times u_i^t) \quad (3.43)$$

Bu problem çözülrken ele alınan kısıtlar altında, Lagrange fonksiyonu minimalleştirilmeli ve bu her bir birim için ayrı ayrı uygulanmalıdır. Problemede yük dengesi birbirini etkileyen kısıttır bu nedenle bir birimdeki değişim diğer bir birimi etkiler [2].

Gevşetilmiş Lagrange, birbirini etkileyen kısıtlarını geçici olarak ihmal ederek problemi çözer. İkili yöntem Lagrange eşitliğini, Lagrange çarpanlarına göre maksimumlaştırırken diğer değişkenlere göre ise minimalleştirir. Yani,

$$q^*(\lambda) = \underbrace{\max}_{\lambda^t} q(\lambda) \quad (3.44)$$

$$q(\lambda) = \underbrace{\min}_{P_i^t, U_i^t} L(P, U, \lambda) \quad (3.45)$$

Bu iki adımda yapılmaktadır:

- $q(\lambda)$ 'yı maksimum değere taşıyan  $\lambda^t$ 'ler bulunur.
- $\lambda^t$ 'nin 1. adımında bulunduğu ve sabit olduğu varsayılır. Lagrange'ın minimalleştiricisi  $P^t$  ve  $u^t$  değerleri ayarlanarak bulunur.

Lagrange fonksiyonunun aşağıdaki şekilde minimalleştiricisi bulunabilir:

$$L = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + BM_i^t] u_i^t + \sum_{t=1}^T \lambda^t (P_d^t - \sum_{i=1}^N P_i(t) \times U_i(t)) \quad (3.46)$$

eşitlik yeniden düzenlenirse şu ifade elde edilir:

$$L = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + BM_i^t] u_i^t + \sum_{t=1}^T \lambda^t P_d^t - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \lambda^t P_i^t u_i^t \quad (3.47)$$

Burada  $\lambda P_d^t$  ifadesi sabit olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda eşitlik şu şekilde olur:

$$L = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + BM_i^t] u_i^t - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \lambda^t P_i^t u_i^t \quad (3.48)$$

(3.48) eşitliğinde, bir birim diğer bir birimden ayrılabilmiştir. Bu durumda denklem şöyle ifade edilebilir:

$$\sum_{t=1}^T [F_i(P_i^t) + BM_i^t] u_i^t - \lambda^t P_i^t u_i^t \quad (3.49)$$

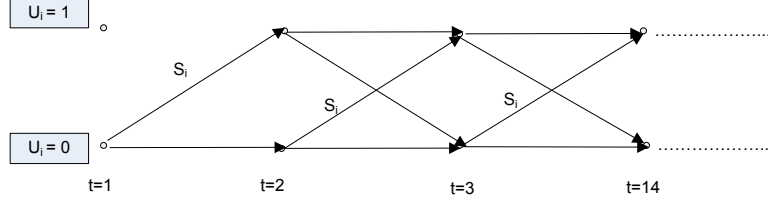
(3.49) eşitliği her bir birim için ayrı ayrı çözülür. Lagrange ifadesinin minimalleştirilmesi için bütün periyotlarda her bir üretim biriminin en küçük değeri aşağıdaki ifadeler kullanılarak bulunur:

$$\min q(\lambda) = \sum_{i=1}^N \min \left\{ \sum_{t=1}^T [F_i(P_i^t) + BM_i^t] u_i^t - \lambda^t P_i^t u_i^t \right\} \quad (3.50)$$

Kısıt:

$$u_i^t P_i^{min} \leq P_i(t) \leq u_i^t P_i^{maks} \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (3.51)$$

Problem bir değişkenli DP ile çözülebilir. Bu durum Şekil 3.2’de, i. birimin iki mümkün durumu için gösterilmiştir [2].



Şekil 3.2: i. birimin iki mümkün durumu

$u_i(t) = 0$  olduğunda fonksiyonun değeri deneme ile minimalleştirilebilir.  $u_i(t) = 1$  olduğunda  $P_i^t$ 'ye göre minimalleştirilmesinden dolayı BM ifadesi eşitlikten düşer.

$$\min[F(P_i^t) - \lambda^t P_i^t] \quad (3.52)$$

Bu fonksiyonun minimalleştiricisini bulmak için birinci derece türev alındığında denklem şu şekilde olur:

$$\frac{d}{dP_i^t} \min[F(P_i^t) - \lambda^t P_i^t] = \frac{d}{dP_i^t} F(P_i^t, u_i^t) - \lambda^t = 0 \quad (3.53)$$

Bu eşitliğin çözümü şu şekildedir:

$$\frac{d}{dP_i^t} F_i(P_i^{(opt)}) = \lambda^t \quad (3.54)$$

Birim limitleri ve  $P_i^{(opt)}$  ilişkisine bağlı olarak üç durum oluşur:

- $P_i^{(opt)} \leq P_i^{min}$

$$\min[F_i(P_i^t) - \lambda^t P_i^t] = F_i(P_i^{min}) - \lambda^t P_i^{min} \quad (3.55)$$

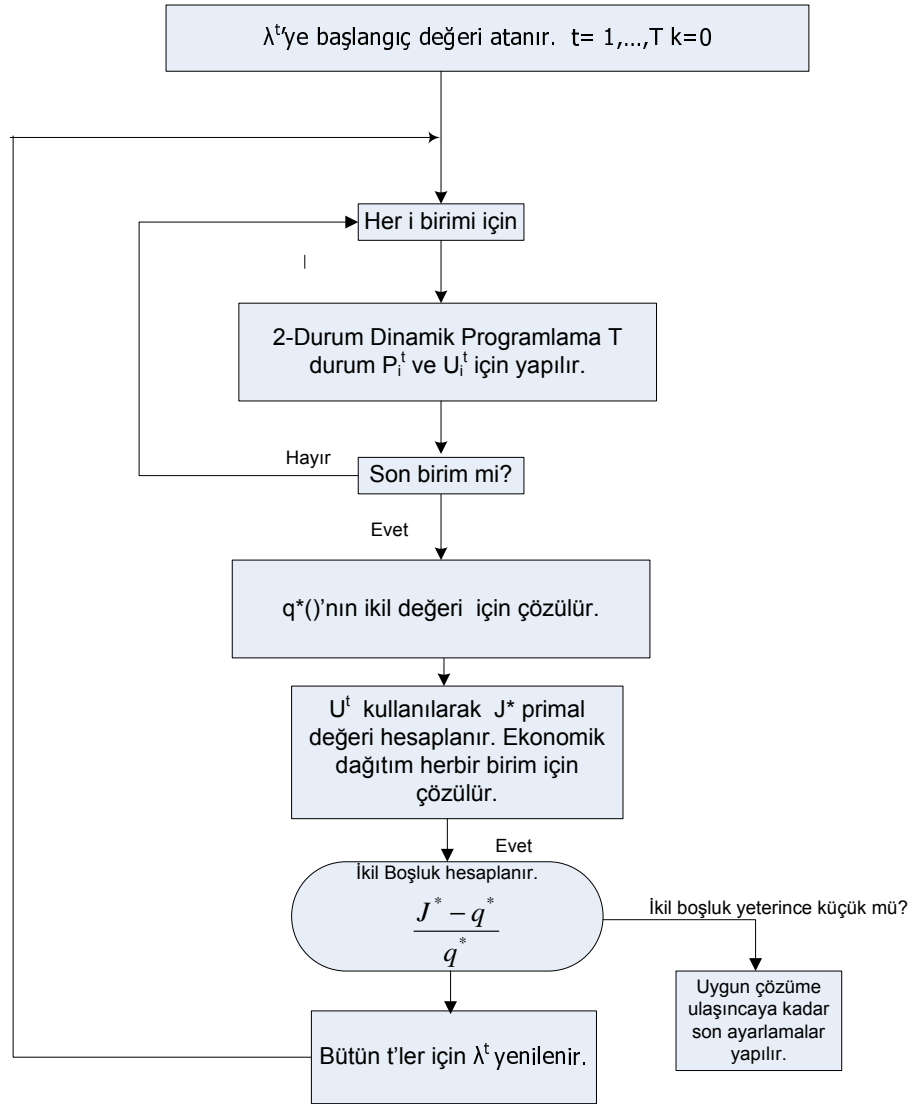
- $P_i^{min} \leq P_i^{(opt)} \leq P_i^{maks}$

$$\min[F_i(P_i) - \lambda^t P_i^t] = F_i(P_i^{opt}) - \lambda^t P_i^{opt} \quad (3.56)$$

- $P_i^{(opt)} \geq P_i^{maks}$

$$\min[F_i(P_i) - \lambda^t P_i^t] = F_i(P_i^{maks}) - \lambda^t P_i^{maks} \quad (3.57)$$





Şekil 3.3: Gevşetilmiş Lagrange yönteminin akış diyagramı

$u_i^t = 0$  olduğunda daha düşük değer elde etmenin tek yolu;  $F_i(P_i) - \lambda^t P_i^t < 0$ 'dir.

Birim yüklenme problemi için gevşetilmiş Lagrange yönteminin akış diyagramı Şekil 3.3'te gösterilmiştir [2].

$\lambda$  değerinin ayarlanması:  $q(\lambda)$  maksimumlaştırabilmek için  $\lambda^t$ 'nin seçimi oldukça önemlidir. Problemin çözümü için  $\lambda^t$ 'nin seçimi önemli olduğu gibi  $\lambda^t$ 'nin ayarlanmasında oldukça önemlidir. Bu nedenle araştırmacılar  $\lambda^t$ 'nin seçimi ve ayarlanmasıyla ilgili çalışmalara devam etmektedirler. Bununla ilgili olarak kullanılan yöntemlerden bazıları 'bisection yöntemi' ve 'doğrusal ara değerlendirme' yöntemidir [3].

### 3.3.2 Ceza fonksiyonları yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi

Ceza fonksiyonları yöntemi, kısıtlı optimizasyon problemlerini kısıtsız optimizasyon problemler dizisine dönüştürerek çözüm bulan bir yöntemdir. Asıl problem aşağıdaki şekilde tanımlansın [91]:

Asıl problem (P):

$$\begin{aligned} \min f_0(x) & \quad (3.58) \\ \text{s.t. } f_i(x) & \leq 0, \quad i=1,2,\dots,n \\ h_j(x) & = 0, \quad j=1,2,\dots,m \\ x & \in S, S \subset R^n \end{aligned}$$

İkil problem şu şekilde tanımlanır:

İkil problem ( $P^*$ ):

$$\begin{aligned} \max \theta(k) & \quad (3.59) \\ k & \geq 0 \end{aligned}$$

Lagrange eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$L(x, l, M) = f_0(x) + l \sum_{i=1}^n [\max\{0, f_i(x)\}]^2 + M \sum_{j=1}^m |h_j(x)| \quad (3.60)$$

$$f_0(x) + \phi_1(f(x), l) + \phi_2(h(x), M) \quad (3.61)$$

$f_i(x)$ , eşitsizlik kısıtlarını,  $h_j(x)$  eşitlik kısıtlarını göstermektedir. Bu denklemde  $l$  ve  $M$  ceza parametrelerini göstermektedir ve pozitiftir.  $\phi_1, \phi_2$  ceza fonksiyonlarıdır. Kısıtların sağlandığı durumda  $l$  ve  $M$  değerleri sıfırdır. Bu yöntem, verilen problemi, optimal çözümleri kısıtsız minimizasyon problemleri dizisiyle elde edilip uygun bölgenin dışından başlangıç problemin çözümüne yaklaştırarak çözer.

Ceza fonksiyonları yönteminin algoritması:

**Başlangıç adımı.**  $\epsilon > 0$  ve  $\beta > 1$  seçilir.  $x_1$  başlangıç çözümü seçilir,  $M_1$  ceza parametresi seçilir.  $k=1$  alınır.

**1. adım.**

$$\min \{f_0(x) + M_1[\max\{0, f(x)\}]\} \quad (3.62)$$

$$\min \{f_0(x) + M_k \alpha x\} = f_0(x_k) + M_k \alpha x_k \quad (3.63)$$

**2. adım.** Eğer  $M_k \alpha x_k < \epsilon$  ise durulur. Değilse,

$$M_{k+1} = \beta M_k \quad (3.64)$$

$k = k + 1$  yapılır ve 1. adım'a dönülür.

Ceza fonksiyonları yöntemini birim yüklenme problemine uygulamak için, kısıt fonksiyonları yönteme uygun olarak oluşturulur. Lagrange eşitliği şu şekildedir:

$$\begin{aligned} L = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + BM_i^t(1 - u_i^{t-1})]u_i^t + \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N KPM_i^t \times (1 - u_i^{t-1}) + \\ + l[\max(0, u_i^t P_i^{\min} - P_i(t)) + \max(0, P_i(t) - u_i^t P_i^{\max}) + \\ + \max(0, P_d^t + P_r^t - \sum_{i=1}^N P_i^{\max} u_i^t) + \\ \max(0, P_i(t) - P_i(t-1)) + \max(0, P_i(t-1) - P_i(t))]^2 + \\ + M[\sqrt{(\sum_{i=1}^N u_i^t P_i(t) - P_d^t)}]^2 \quad (3.65) \end{aligned}$$

Oluşturulan bu Lagrange eşitliği kullanılarak, ceza fonksiyonları yönteminin adımları problemin çözümüne sırasıyla uygulanır.

### 3.3.3 Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi

Genişletilmiş Lagrange çarpanları ceza çarpanları yöntemi de ikil optimizasyon temelinde çözüm yaklaşımı sunar [91].

Asıl problem (P) aşağıdaki şekilde tanımlansın:

$$\begin{aligned} \min f_0(x) \quad (3.66) \\ s.t f_i(x) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,n \\ h_j(x) = 0 \quad j=1,2,\dots,m \\ x \in S, S \subset R^n \end{aligned}$$

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yönteminin, ceza fonksiyonları yöntemine göre farkı ceza fonksiyonlarına değil, değiştirilmiş Lagrange çarpanlarına dayanmasıdır. Genişletilmiş Lagrange çarpanları ceza çarpanları yöntemi için Lagrange eşitliği aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$L(x, l, v, \mu, \beta) = f_0(x) + \sum_i^m l_i f_i(x) + \sum_j^q v_j h_j(x) + \sum_i^m \mu_i [f_i(x)]^2 + \sum_j^q \beta_j [h_j(x)]^2 \quad (3.67)$$

Lagrange çarpanları yöntemi genişletilmiş Lagrange ceza fonksiyonu üzerinden geliştirilmiştir.

$$VIOL(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{|f_i(x)|\} \quad (3.68)$$

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yönteminin algoritması şu şekildedir:

$$l = (l_1^1, l_2^1, \dots, l_m^1), \mu = (\mu_1^1, \mu_2^1, \dots, \mu_m^1) \text{ olsun.}$$

$$VIOL(x_0) = +\infty, k= 1, \epsilon > 0 \text{ olmak üzere}$$

İç döngü şu şekildedir:

$$\min L(x, l^k, \mu^k) \text{ eğer}$$

$$VIOL(x_k) = 0 \quad \text{veya} \quad VIOL(x_k) < \epsilon \quad (3.69)$$

ise, durulur. Değilse,

$$VIOL(x_k) < (1/4)VIOLx_{k-1} \quad (3.70)$$

ise dış döngüye gidilir.

$$VIOL(x_k) \geq (1/4)VIOLx_{k-1} \quad (3.71)$$

ise o zaman

$$\|f_i(x_k)\| > (1/4)VIOLx_{k-1} \quad (3.72)$$

eşitsizliğini sağlayan her  $i$  için  $\mu_i = 10\mu_i$  yapılır ve iç döngü tekrarlanır.

Dış döngü şu şekidedir:

$$l_i^{k+1} = l_i^k + 2\mu_i^k f_i(x_k) \quad (3.73)$$

$k= k+1$  seçilerek iç döngüye gidilir [91].

Bu yöntemle birim yüklenme probleminin çözümü için Lagrange eşitliği oluşturulur. Kısıtlar oluşturulurken aylak değişkenler eklenir. Lagrange eşitliği şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
L = & \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + BM_i^t(1 - u_i^{t-1})]u_i^t + \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N KPM_i^t \times (1 - u_i^{t-1}) + \\
& l_1(u_i^t P_i^{min} - P_i(t) + h_i^t) + l_2(P_i(t) - u_i^t P_i^{maks} + h_i^t) + \\
& l_3(\sum_{i=1}^N u_i^t P_i(t) - P_d^t) + l_4(P_d^t + P_r^t - \sum_{i=1}^N P_i^{maks} u_i^t + h_i^t) + \\
& l_5(P_i(t) - P_i(t-1) + h_i^t)^2 + l_6(P_i(t-1) - P_i(t) + h_i^t)^2 \\
& + \mu_1(u_i^t P_i^{min} - P_i(t) + h_i^t) + \mu_2(P_i(t) - u_i^t P_i^{maks} + h_i^t) + \\
& \mu_3(\sum_{i=1}^N u_i^t P_i(t) - P_d^t) + \mu_4(P_d^t + P_r^t - \sum_{i=1}^N P_i^{maks} u_i^t + h_i^t) + \\
& \mu_5(P_i(t) - P_i(t-1) + h_i^t) + \mu_6(P_i(t-1) - P_i(t) + h_i^t) \quad (3.74)
\end{aligned}$$

### 3.3.4 MSG yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi

MSG yöntemi Gasimov tarafından yapılan ve optimizasyon alanında büyük bir boşluğu dolduran önemli bir yöntemdir. Genişletilmiş Lagrange ikillik, ilk olarak Azimov and Gasimov tarafından dışbükey olmayan problemlerin çözümü için önerilmiştir [92]. Bu yöntemle, alışılagelmiş Lagrange ikil problemin çözümünde sıkça karşılaşılan ikil aralığın giderilmesini sağlamıştır. Bu ikil problem, asıl problemin özelliklerinden bağımsız olarak her durumda içbükeydir [93].

Herhangi bir dışbükeylik ve diferansiyellenebilirlik şartı konulmaksızın asıl problem ile ikil problemlerin eniyi çözümlerinin eşit olduğu MSG ile gösterilmiştir. Klasik Lagrange fonksiyonlarından farklı olarak görüntü kümesine destek hiperdüzlemlerle yaklaşma yerine konilerle yaklaşma üzerine kurulmuştur. İkil problemin kurulmasında ceza parametresi kullanılmamaktadır. MSG ile herhangi bir alt problem çözmeksizin her adımda ikil problemin değerinin güçlü artan olduğu da tanımlanmıştır. Bu yöntemle oluşturulan dizinin problemin en iyi çözümüne yakınsadığı ispatlanmıştır [92–93].

İkil fonksiyon  $H(u, c)$ , açıkça belirli olan bir fonksiyon değildir. Ancak  $f(x)$  ve  $h(x)$  sürekli fonksiyonları ve  $S$  kompakt kümesi için dışbükey bir fonksiyondur. İkil fonksiyonun dışbükeyliği, ikil problem (D)'nin çözümünde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

MSG algoritması'nın adımları aşağıdaki gibidir:

**Başlangıç Adımı.**  $c_0 \geq 0$  olacak şekilde  $(v_0, c_0)$  vektörünü seçilir.  $k = 0$  alınır ve 1. adıma gidilir.

**1. adım.** Verilmiş  $\{\overline{vc}\}$  için aşağıda verilen alt problem çözülür:

$x \in S$  k.a.

$$enf(x) + c_k \|h(x_k)\| - \langle v_k, h(x_k) \rangle \quad (3.75)$$

$x_k$ , alt problemin bir çözümü olsun. Eğer  $h(x_k) = 0$  ise o zaman durulur.  $(v_k, c_k)$ ,  $(D)$  için  $x_k$  ise,  $(P)$  için çözümdür. Değilse 2. adıma gidilir.

**2. adım.**  $s_k$  ve  $\epsilon_k$  pozitif sabit adım uzunlukları olmak üzere,

$$v_{k+1} = v_k - s_k h(x_k), c_{k+1} = c_k + (s_k + \epsilon_k) \|h(x_k)\| \quad (3.76)$$

$k = k+1$  alınarak 2. adıma dönülür.

Adım uzunluğu aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$0 < \epsilon_k < s_k = \frac{\delta(\overline{H}) - H(v_k, c_k)}{5 \|h(v_k)\|^2} \quad (3.77)$$

MSG yöntemini birim yüklenme problemine uygulamak için, kısıt fonksiyonları aylak değişkenler eklenerek oluşturulur ve sivri genişletilmiş Lagrange eşitliği tanımlanır. Kısıtlar aşağıdaki şekilde ifade edilir:

- ÜYK kısıtları:

$$h_1(N, T) = u_i^t P_i^{min} - P_i(t) + h_i^t = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3.78)$$

$$h_2(N, T) = P_i(t) - u_i^t P_i^{maks} + h_i^t = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3.79)$$

- Yük denge kısıtı:

$$h_3(T) = \sum_{i=1}^N u_i^t P_i(t) - P_d^t = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3.80)$$

- Dönme rezervi kısıtı:

$$h_4(T) = P_d^t + P_r^t - \sum_{i=1}^N P_i^{maks} u_i^t + h_i^t = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3.81)$$

- Rampa oranı kısıtları:

$$h_5(N, T) = P_i(t) - P_i(t-1) + h_i^t = 0, \quad u_i(t) = 1 \& u_i(t-1) = 1, \\ i = 1, 2, \dots, N, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3.82)$$

$$h_6(N, T) = P_i(t-1) - P_i(t) + h_i^t = 0, \quad u_i(t) = 1 \& u_i(t-1) = 1, \\ i = 1, 2, \dots, N, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3.83)$$

MSG yöntemi için H matrisi şu şekildedir:

$$H = [h_1(N, T) \ h_2(N, T) \ h_3(T) \ h_4(T) \ h_5(N, T) \ h_6(N, T)] \quad (3.84)$$

Sivri genişletilmiş Lagrange eşitliği şu şekilde oluşturulur:

$$\begin{aligned} L = & \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N [F_i(P_i^t) + BM_i^t(1 - u_i^{t-1})]u_i^t + \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N KPM_i^t \times (1 - u_i^{t-1}) + \\ & c[\sqrt{((u_i^t P_i^{min} - P_i(t) + h_i^t)^2 + (P_i(t) - u_i^t P_i^{maks} + h_i^t)^2 + \\ & (\sum_{i=1}^N u_i^t P_i(t) - P_d^t)^2 + (P_d^t + P_r^t - \sum_{i=1}^N P_i^{maks} u_i^t + h_i^t)^2 + \\ & (P_i(t) - P_i(t-1) + h_i^t)^2 + (P_i(t-1) - P_i(t) + h_i^t)^2)}] \\ & -v_i^t[(u_i^t P_i^{min} - P_i(t) + h_i^t) + (P_i(t) - u_i^t P_i^{maks} + h_i^t) + \\ & (\sum_{i=1}^N u_i^t P_i(t) - P_d^t) + (P_d^t + P_r^t - \sum_{i=1}^N P_i^{maks} u_i^t + h_i^t) + \\ & (P_i(t) - P_i(t-1) + h_i^t) + (P_i(t-1) - P_i(t) + h_i^t)] \quad (3.85) \end{aligned}$$

(3.85) eşitliği kullanılarak, MSG yönteminin adımları problemin çözümüne sırasıyla uygulanır.

### 3.3.5 F-MSG yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi

Dışbükey olmayan kısıtsız en iyileme problemlerinin bütünsel en iyi çözümlerini bulmak için geliştirilmiş yöntemlerin yetersizliği nedeniyle 1. adımda kısıtsız en iyileme için yerel en iyiyi veren yöntemlerin kullanılması MSG algoritmasının asıl-ikil eniyi çözümü aşarak durmasına sebep olabilmektedir [94–95]. MSG algoritmasının kullanılmasıyla ilgili bir diğer zorlukta, yaklaşık veya kesin olarak bilinen asıl-ikil en iyi amaç fonksiyonu değerine ihtiyaç duymasıdır. Bu zorlukları aşmak amacıyla Gasimov ve Üstün F-MSG'yi geliştirmiştir [95].

F-MSG, genişletilmiş Lagrange ikil fonksiyon için keyfi bir üst sınır seçilmesiyle çalışmaya başlar ve seçilen üst sınırın altında uygun çözüm olup olmadığını kontrol eder. Çözüm varsa buna karşı amaç fonksiyonu değeri, yeni üst sınır olarak alınır ve öteleme yeniden başlar. Bu durum, verilen üst sınıra uygun çözüm vermeyen bir sınıra gelinceye kadar devam eder. Uygun çözüm vermeyen sınır, alt sınır olarak alınır ve problemin en iyi 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. F-MSG algoritmasında, MSG algoritmasının birinci

adımındaki verilmiş  $(u_k, c_k)$  için problem,

$$enf(x) + c_k \|h(x_k)\| - \langle u_k, h(x_k) \rangle \quad (3.86)$$

gevşetilerek izleyen kısıt sağlama problemi  $P(H_n)$ 'ne dönüştürülmüştür.

$$f(x) + c_k \|h(x_k)\| - \langle u_k, h(x_k) \rangle \leq H_n \quad (3.87)$$

F-MSG algoritması şu şekildedir:

**1. adım.**  $\epsilon_1, \epsilon_2, \Delta_1, M$  pozitif sayıları ve  $H_1$ , keyfi sayısını seçilir.

$n = 1, t = 0, q = 0$  al ve 2. adıma gidilir.

**2. adım.** Genişletilmiş Lagrange çarpanlarını  $(u_1^n, c_1^n) \in R^m \times R_+$  ve  $0 < l(1) < M$  seçilir ve  $k = 1$  alınır.

$u_k = u_1^n$  ve  $c_k = c_1^n$  alınır ve 3. adım'a gidilir.

**3. adım.** Verilen  $(u_k, c_k)$  için izleyen kısıt sağlama problemini çözülür:  $P(H_n)$ :

$$f(x) + c_k \|h(x_k)\| - \langle u_k, h(x_k) \rangle \leq H_n \quad (3.88)$$

için  $x \in S$  bulunur. Eğer bir çözüm mevcut değilse (örneğin eğer  $l(k) > M$  ise) 6. adıma gidilir. Eğer bir  $x_k$  çözümü varsa  $h(x_k) = 0$  olup olmadığı kontrol edilir. Eğer  $h(x_k) = 0$  veya  $\|h(x_k)\| \leq \epsilon_1$  ise 5. adıma değilse 4. adıma gidilir.

**4. adım.** İkili değişkenler güncellenir,

$$u_{k+1} = u_k - \alpha s_k h(x_k), \quad c_{k+1} = c_k + (1 + \alpha) s_k \|h(x_k)\| \quad (3.89)$$

$s_k$  izleyen şekilde tanımlanan adım uzunluğu parametresi:

$$0 < s_k = \frac{\delta \alpha (H_n) - L(x_k, u_k, c_k)}{(\alpha^2 + (1 + \alpha)^2) \|h(x_k)\|} \quad (3.90)$$

veya

$$0 < s_k = \frac{\delta [\alpha (H_n) - L(x_k, u_k, c_k) + (\bar{c} - c_k) \|h(x_k)\|]}{(\alpha^2 + (1 + \alpha)^2) \|h(x_k)\|^2} \quad (3.91)$$

$\alpha > 0$  ve  $0 < \delta < 2$

Ayrıca yakınsaklık için ilgili ikili çarpanlara  $(u_k, c_k)$  göre  $s_k$ 'nin aşağıdaki özelliği sağlanması gerekir.

$$s_k \|h(x_k)\| + c_k - \|u_k\| > l(k) \quad (3.92)$$



$k = k+1$  alınır ve  $k \rightarrow \infty$  iken  $l(k) \rightarrow \infty$  olacak şekilde  $l(k)$  güncellenir ve 3. adım tekrarlanır.

**5. adım.**  $x_k, h(x_k) = 0$  şartını sağlayacak şekilde  $P(H_n)$ 'nin bir çözümü olsun. Bu durumda  $L(x_k, u_k, c_k) = f(x_k)$  olur.  $q = q + 1$  alınır ve  $t$  kontrol edilir. Eğer  $t = 0$  ise,  $\Delta_{n+1} = \Delta_n$  değilse,  $\Delta_{n+1} = \Delta_n/2$  alınır ve  $\Delta_{n+1}$  kontrol edilir. Eğer  $\Delta_{n+1} < \epsilon$  ise durulur.  $f(x_k)$ , yaklaşık eniyi çözüm,  $x_k$  ve  $(u_k, c_k)$  ise sırasıyla yaklaşık asıl-ikil eniyi çözümlerdir. Değilse  $H_{n+1} = H_n - \Delta_{n+1}$ ,  $n = n + 1$  alınır ve 2. adıma gidilir.

**6. adım.**  $t = t + 1$  alınır. Eğer  $q = 0$  ise o zaman  $\Delta_{n+1} = \Delta_n$ , değilse,  $\Delta_{n+1} = \Delta_n/2$  alınır.  $H_{n+1} = H_n + \Delta_{n+1}$   $n = n + 1$  alınır ve 2. adıma gidilir.

F-MSG algoritmasının 3 ve 4. adımları iç döngü; 2, 5 ve 6. adımları dış döngü olarak düşünülebilir [94-95].

Bu yöntemle birim yüklenme problemini çözmek için sivri genişletilmiş Lagrange eşitliği MSG yöntemine benzer şekilde oluşturulur. Bu algoritmanın adımları sırasıyla bu problem için çözülür.

### 3.4 Birim Yüklenme Probleminin Çözümü İçin Kullanılan Akıllı Sezgisel Yaklaşımlar

#### 3.4.1 Bulanık mantık yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi

İlk olarak Lofti A. Zadeh tarafından tanımlanan bulanık mantığın temeli, bulanık küme ve alt kümelere dayanır. Matematiksel modeli tam olarak oluşturulamayan, karmaşık yapıya sahip ya da veri ve donanımın yetersizliği olan sistemlerin kontrolünde, insan zekasını kontrol sisteminin içine sokabilecek bir kontrol yöntemi olarak bulanık kontrol algoritması geliştirilmiştir [100].

Bulanık kümeler üzerinde ilk çalışmalar Zadeh tarafından yapıldıktan sonra, bu mantık, Mamdani tarafından, bulanık mantık denetleyicilerinin tasarımında kullanılmıştır. Bulanık mantık, insan düşünce yapısına ve kullanılan dilsel öğelere, klasik mantık sistemlerinden daha yakındır. Bulanık mantık denetleyicisi, uzman bilgisi ve tecrübesine dayalı olan sözel kontrol ifadelerini, otomatik kontrol ifadelerine çevirme işlemi yapmaktadır .

Bulanık küme, aitlik derecesi üyelik değeri ile tanımlanmış olan kümeyi

ifade eder. Klasik yaklaşımda, bir varlık kümenin elemanıdır ya da değildir. Bulanık mantık, klasik küme gösteriminin genişletilmesidir. Bulanık mantıkta küme aitlik derecesi 0 ile 1 arasında değişir. Bulanık mantık'da, bir önermenin tümüyle doğru ya da yanlış olduğu gibi bir yaklaşım yoktur. Burada, önermeye ait bir doğruluk derecesi yaklaşımı vardır. Böylece, doğru ile yanlış arasında, keskin bir geçiş değil, yumuşak bir geçiş söz konusudur. Örneğin bulanık mantıkta, birim yüklenme problemi için başlangıç maliyeti değeri düşünüldüğünde, başlangıç maliyeti düşük, orta, yüksek gibi değerler alabilir [104].

Tanımlanan bir kesin kümede, evrensel kümenin elemanlarına 0-1 kapalı aralığında değerlerin atanmasıyla, bu elemanların kesin kümenin elemanı olup olmadıklarını ve atanan değerlerle bu elemanların kümeye aitlik dereceleri belirlenir. Bulanık kümelerin belirlenmesinde aşağıdaki şartlara dikkat edilmelidir.

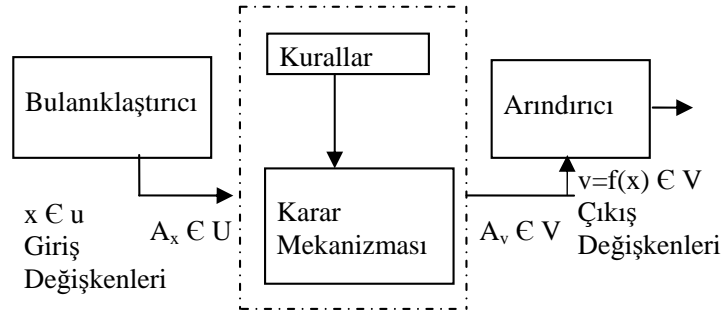
- Evrensel kümede tanımlanan bulanık kümeler simetrik olarak dağıtılmalıdır.
- Her bir değişken için tek sayıda bulanık küme tanımlanmalıdır. Bu sayede, bazı bulanık kümelerin ortada kalması sağlanabilir. Tipik olarak her sistem değişkeni için üç, beş ya da yedi tane bulanık küme kullanılır. Burada bulanık küme ile ifade edilmek istenen, örneğin sıcaklık için üç tane tanımlayacak olursak, soğuk-ılık-sıcak değerleridir.
- Tüm değerlerin tanımlı olması için, bulanık kümelerin belirli bir yüzde ile üst üste binmesi sağlanmalıdır. Böylece, çıkışın belirlenmesinde de birden fazla kuralın kullanılması sağlanmış olur.
- Daha az hesaplama zamanı gerektiren üçgen ya da yamuk üyelik fonksiyonları seçilmelidir.

Üyelik fonksiyonları, bulanık kümelerde elemanların, bulanık kümenin temsil ettiği özellikleri ne ölçüde taşıdıklarını gösteren üyelik derecelerini atar. Yani, uygulamaya konu olan sistemin girişleriyle, tanımlanan bulanık kümeler arasında bir bağıntı sağlar. Yukarıda da belirtildiği gibi, hesaplama zamanının kısa olmasından dolayı, genellikle üçgen ya da yamuk türü ya da genellikle her sistem için iyi bir yaklaşım sağladığı için, genelleştirilmiş çan eğrisi gibi üyelik fonksiyonları kullanılır. Üyelik fonksiyonları çeşitlerinden bazıları, Bell, üçgen, yamuk ve Gauss'dur [104].

Bulanık kontrol, giriş ve çıkış parametrelerinden bir kısmı veya tamamı bulanık üyelik fonksiyonları tarafından tanımlanan kural tabanlı bir kontrol sistemidir. Kontrol sisteminin önemli özellikleri, kuralların sözel değişkenlerle ifade edilebilir olması, uzman tecrübesinin kontrol kurallarına yansıtılabilmesi ve kesin olmayan bilgiler üzerinden çıkarım yapabilme yeteneğine sahip olmasıdır. Wang - Mendel, bulanık tabanlı fonksiyonları bulmuşlardır. Oldukça genel olan bu fonksiyonlar, hem nümerik hem de dilsel bilgiyi bir arada birleştirir. Bulanık kontrolde bilgiler iki kısımda incelenebilir:

- Standart, başlangıçta belirli kurallar: Bu kurallar doğrudan kurallardır.
- Bulanık If-then kuralları: Bilinmeyen ve kontrol edilecek bir sistemin davranışını tanımlayan If-then kuralları vardır. Doğrudan olmayan kontrolde dilsel kurallar sistemi modellemede kullanılır. Bir bulanık kontrolörün temelini, kural çözümleyici ve karar mekanizması oluşturur.

Şekil 3.4'te bir bulanık sistemin yapısı gösterilmiştir [104].



Şekil 3.4: Bulanık mantık sistemi

Bulanık mantık sistemi, kesin girişleri, kesin çıkışa dönüştürür. Dört tane bileşeni vardır. Bunlar; kural tabanı, bulanıklaştırıcı, karar mekanizması ve arındırıcıdır. Kurallar belirlendiğinde, bulanık mantık sistemi kesin girişleri, kesin çıkışa doğrusal olmayan şekilde bir dönüştürme olarak düşünülebilir. Dönüştürme  $v = f(x)$  şeklinde gösterilir.  $x$ , giriş ve  $v$ , çıkıştır. Şekil 3.4'ten girişin bulanık mantık sistemindeki durumu gözlenerek böyle bir fonksiyonun matematiksel modeli çıkarılabilir. Bulanıklaştırıcı  $x$ ,  $A_x$  diye bir sete dönüştürülür. Karar mekanizması bloğundan geçerse başka bir bulanık sete dönüşür, buna da  $A_v$  denir. Daha sonra bu,  $f(x)$ 'e dönüştürülür. Bu da arındırıcı bloğundan geçerek  $f(x)$  olur. Bu

ilişkileri yazabilmek için bulanıklaştırıcı, ayrıştırıcı ve karar mekanizması seçimleri yapılmalıdır. Tek bir bulanıklaştırıcı, maksimum-çarpım, çarpma mekanizması, yüksek ayrıştırıcı için üyelik fonksiyonu seçimini açık bırakılarak  $v = f(x)$  şöyle gösterilebilir [104]:

$$v = f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M \theta_l \prod_{i=1}^p \mu_{F_i} x_i}{\sum_{i=1}^M \prod_{i=1}^p \mu_{F_i} x_i} \quad (3.93)$$

Bu denklemde, M, kural sayısını, p girdi sayısını göstermektedir.  $\theta_l$ , üyelik fonksiyonunun ağırlık merkezidir. l. Kurala karşılık gelen eşitlik şu şekilde gösterilebilir:

$$v = f(x) = \sum_{l=1}^M \theta_l \xi_l(x) \quad (3.94)$$

$\xi_l(x)$  bulanık temel fonksiyonları olarak adlandırılır ve şu şekilde gösterilebilir:

$$\xi_l(x) = \frac{\prod_{i=1}^p (\mu_{F_i}) x_i}{\sum_{i=1}^M \prod_{i=1}^p \mu_{F_i} x_i} \quad (3.95)$$

Bulanık mantık yöntemi güç sistemleri problemlerinde, özellikle güç sistemleri kontrolünde, optimizasyonunda ve kararlılık analizlerinde kullanılırlar. Bulanık mantık teorisi kullanılarak kısıtlar bulanık kümelerle modellenebilir [104].

### 3.4.2 Benzetimli tavlama yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözülmesi

Kombinasyonel optimizasyon tabanlı güç sistemleri için farklı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Araştırmacılar, farklı teknikler kullanarak amaç fonksiyonunu minimum yapmaya çalışmışlardır. Bütün yöntemler optimal çözümü bulmaya gereksinim duyarlar. Sezgisel yaklaşımlarda genel olarak iki temel strateji vardır [64]:

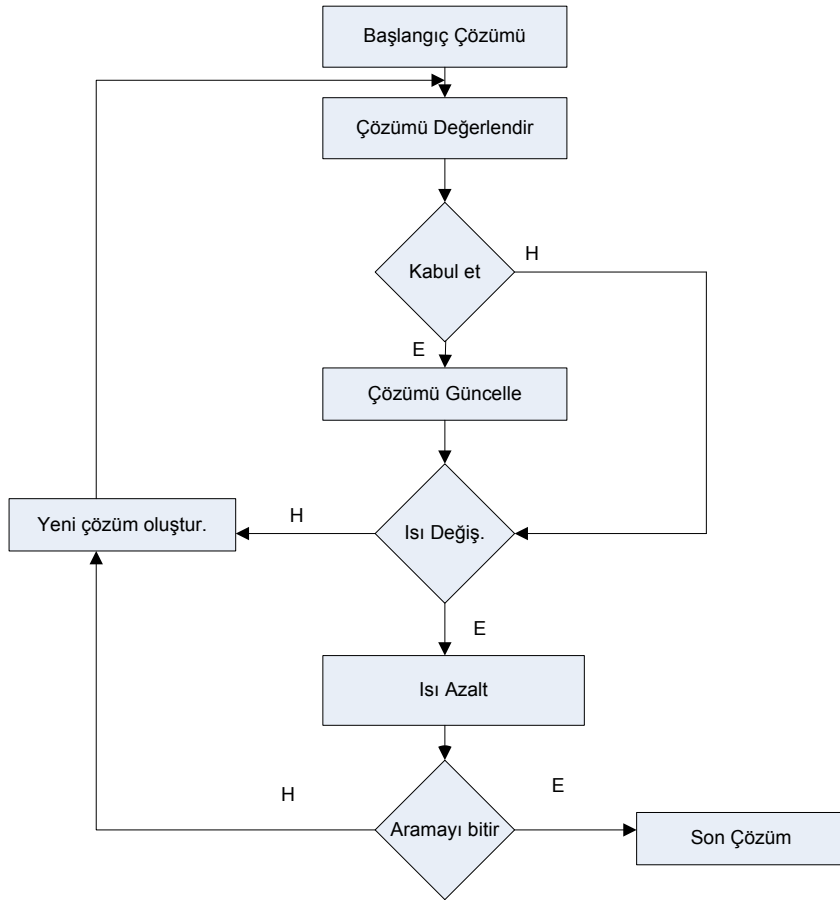
- Ayrıştırma teknikleri
- Öteleme teknikleri

Ayrıştırma yönteminde, problem alt problemlere ayrılır. Gerçekte çok iyi çözümler elde edilebilir. Fakat bu üstünlük, bütün güç sistemi analizi problemlerine uygulanamayabilir. Öteleme tekniklerinde ise genellikle minimum noktalara takılma durumları söz konusu olabilir.

Sezgisel yaklaşımlardan olan benzetimli tavlama yöntemi, kombinasyonel optimizasyon problemlerinin çözümünde iyi sonuçlar verebilmektedir. Bu yöntem,

asimtotik olarak optimum çözüme yakınsar. Benzetimli tavlama yöntemi, yüksek bir sıcaklık değerinde yeni bir konfigürasyondan başlar. Herbir hesaplama adımında mevcut çözümün komşuları arasından çok sayıda çözüm üretilir. Yeni çözümler belirlenen kriterlere göre kabul edilir veya reddedilir. Bu yöntem, yerel optimada sıkışır, Boltzman faktörü hesaplanır. Rassal sayı, Boltzman faktöründen küçükse, yeni konfigürasyon elde edilir, değilse bu taşımadan önce yeni konfigürasyon diğer adım için kullanılır. Hesaplama adımlarından sonra sıcaklık belirlenen bir fonksiyona göre azaltılır. Algoritma, istenen iterasyona ya da sıcaklık minimum değerine ulaştığında yani istenen çözüme ulaşıldığında sonlandırılır. Olasılıksal seçim kuralı nedeniyle, benzetimli tavlama yerel optimayı atlayabilir ve istenilen global optimaya ilerleyebilir [64].

Benzetimli tavlama yöntemin en önemli dezavantajlarından biri çözüme ulaşma süresinin bazı yöntemlere göre daha uzun sürmesidir. Bu yöntemin en temel gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5: Benzetimli tavlama yönteminin temel akış şeması

Denge durumunda verilen konfigürasyon olasılığı  $P_{confg}$ , Boltzman dağılımıdır.

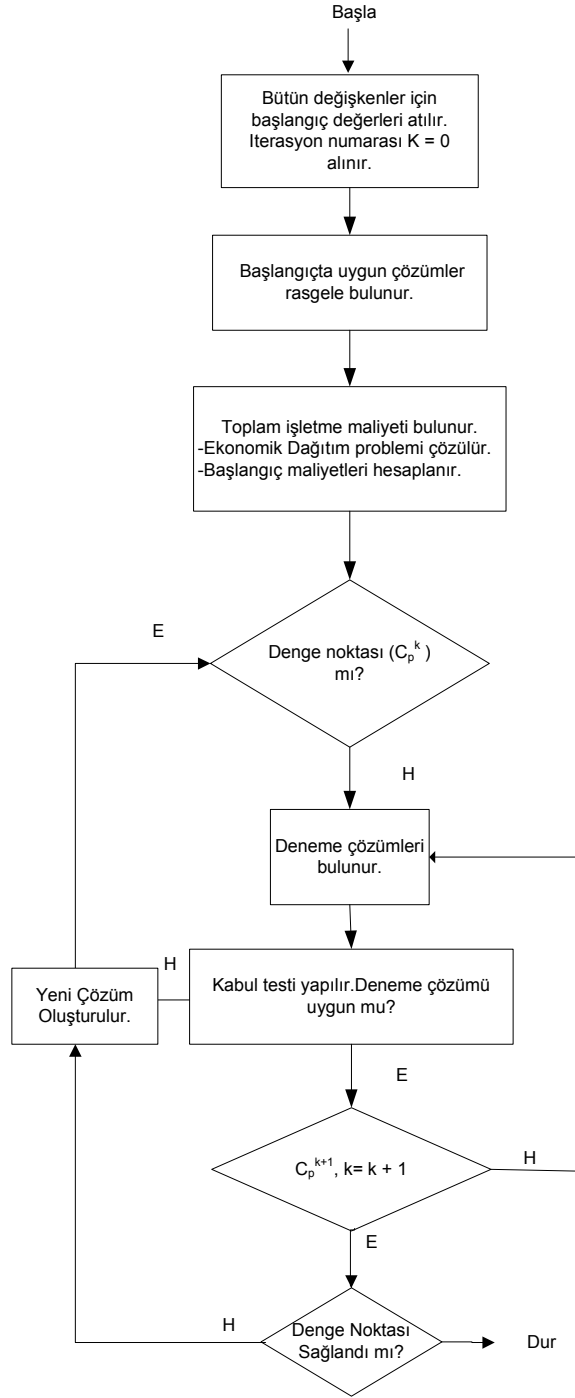
$$P_{confg} = K.exp \frac{-E_{confg}}{C_p} \quad (3.96)$$

(3.96) denkleminde  $E_{confg}$ , verilen konfigürasyonun enerjisini ve K da sabit değeri göstermektedir. Metropolis, sabit  $C_p$  sıcaklığında termal denge noktasına ulaşmak için Monte Carlo simülasyonunu önermiştir. Bu yöntemde, deneme konfigürasyonu elde etmek için katının akış konfigürasyonu rasgele üretilir.  $E_c$  ve  $E_t$  sırasıyla, mevcut konfigürasyonların ve deneme konfigürasyonunun enerji seviyelerini gösterir. Eğer,  $E_c > E_t$  düşük enerji seviyesine ulaşırsa, deneme konfigürasyonu kabul edilir ve bu mevcut konfigürasyon olur. Diğer taraftan, eğer  $E_c \leq E_t$  ise, deneme konfigürasyonu mevcut konfigürasyon olarak kabul edilir, olasılığı da  $exp[(E_c - E_t)/C_p]$  olur. Bu işlem, yüksek enerji seviyesinin geçişi reddedilmeyene kadar devam eder. Sonuçta, Boltzman dağılımı olasılıksal değere yakınsadığında, termal dengeye ulaşılır.  $C_p$  giderek azalır ve yeni enerji seviyesine ulaşmaya kadar Metropolis simülasyonu devam eder.  $C_p$ , sıfıra yaklaştığında düşük enerji konfigürasyonu pozitif olasılıkta olur [64].

Birim yüklenme probleminin çözümünde benzetimli tavlama yöntemini uygulayabilmek için iki tür değişken belirlenmelidir. Bu değişkenler, birim durumunu gösteren değişkenler ve birimlerin çıkış güçleridir. Genel olarak problem, iki alt problemden oluşur. Bunlar; kombinasyonel optimizasyon ve doğrusal olmayan optimizasyon problemleridir. Benzetimli tavlama yöntemi, kombinasyonel optimizasyon problemlerini çözmek amacıyla kullanılır [63–64].

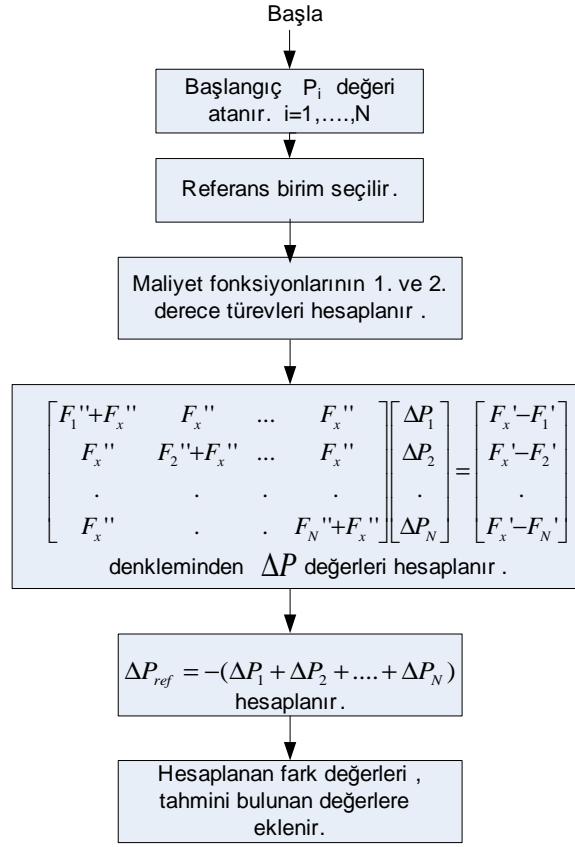
Birim yüklenme problemini benzetimli tavlama yöntemi ile çözebilmek için problemin çözümünde alt problem olarak ekonomik dağıtım analizinin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmadaki ekonomik dağıtım analizlerinde, ikinci derece gradient ve lamda-öteleme yöntemleri kullanılmıştır. Benzetimli tavlama yönteminin birim yüklenme problemi yöntemi ile çözümü Şekil 3.6'da verilmiştir. İkinci derece gradient yöntemi ve lamda-öteleme yöntemini kullanıldığı her iki durum içinde problem çözülürken aynı başlangıç değerleri kullanılmıştır.

İkinci derece gradient yöntemi, maliyet fonksiyonlarının ikinci derece türevlerinden faydalanılarak çözüm bulan ekonomik dağıtım analizi yöntemidir. Yöntemin akış diyagramı Şekil 3.7'de verilmiştir.

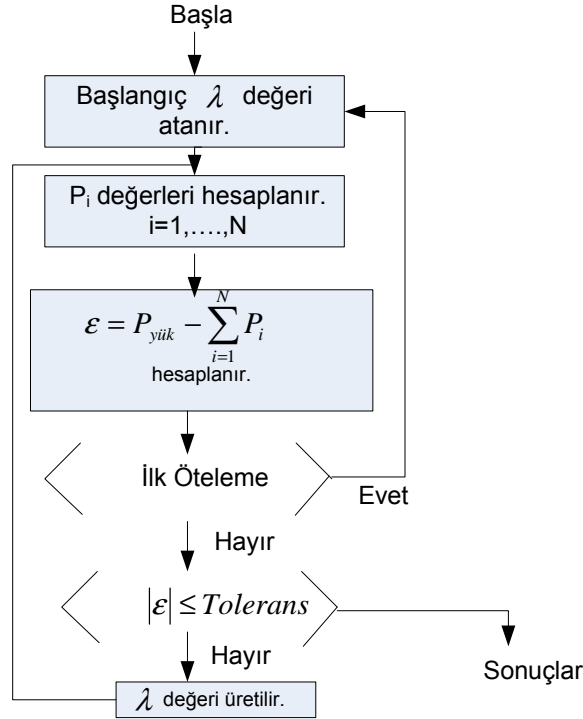


Şekil 3.6: Birim yüklenme probleminin benzetimli tavlama yöntemi ile çözümünün akış şeması

Lamda-öteleme yöntemi, sistemin lamda değerini çözen ve ekonomik dağıtım yapan bir yöntemdir. Bu yöntemde, üretim birimlerinin çıkış güçleri toplamı talep edilen yükü karşılaştırılır, denge sağlanmıyorsa başka lamda değerleri için ötelemelere devam edilir. Lamda-öteleme yöntemi Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: İkinci derece gradient yönteminin akış şeması



Şekil 3.8: Lamda öteleme yöntemi



## 4. UYGULAMALAR

Bu bölümün ilk kısmında, yük talep tahmini analizi için geliştirilen matematiksel yaklaşım sunulmuştur. Önerilen bu yaklaşım, YSA ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde verilmiştir. İkinci kısmında, birim yüklenme problemi dört birimden oluşan Tunçbilek termik santrali ve on ile yüz birim arasında değişen farklı sistemler için farklı kısıtlar altında çözülmüştür. Çözüm için ilk önce, matematiksel yöntemlerden, gevşetilmiş Lagrange, ceza fonksiyonları, genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, MSG ve F-MSG yöntemleri kullanılmıştır. Daha sonra, akıllı sezgisel yaklaşımlardan bulanık mantık ve benzetimli tavlama yöntemleri de kullanılarak çözüm yapılmıştır. Son kısmında ise, önerilen yük tahmini analizinden bulunan yük değerleri kullanılarak, Tunçbilek termik santralinin bu değerlere göre yaklaşık talep değerleri bulunarak birim yüklenme problemi yeniden çözülmüş ve sonuçlar tablolar halinde verilerek karşılaştırma yapılmıştır.

### 4.1 Yük Tahmini Analizi Uygulamaları

#### 4.1.1 Matematiksel model kullanılarak saatlik gerçek veriler için yük tahmini

Yük tahmini analizi için geliştirilen matematiksel model, daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak kısa, orta ve uzun dönem saatlik yük tahmini analizi yapılmasına olanak veren bir yaklaşımdır. Üstelik orta ve uzun dönem yük tahmini analizini saatlik hata değerlerinde bulabilen literatürdeki tek yaklaşımdır. Bu model, Türkiye’de TEİAŞ’tan alınan dört yılı saatlik geri kalanı yıllık değerlerden oluşan toplam yirmialtı yıla ait gerçek yük verileri kullanılarak bulunmuştur. Önerilen yöntem iç içe geçen üç alt bölümden oluşmaktadır. İlk kısım; yıllık yük değerlerinin modellenmesi, ikinci kısım; yıl içerisinde haftalık yük değerlerinin modellenmesi, son kısım ise; 2-B (2-Boyutlu) matematiksel gösterim kullanılarak saatlik yük değişimlerinin modellenmesidir. Bu yaklaşım yardımıyla farklı matematiksel modeller kullanılarak en küçük hata değerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Hata değerlerini hesaplamak için literatürde en çok kullanılan hata karelerinin ortalamasının karekökü (RMSE) ve ortalama mutlak yüzdeler hata (MAPE) kul-

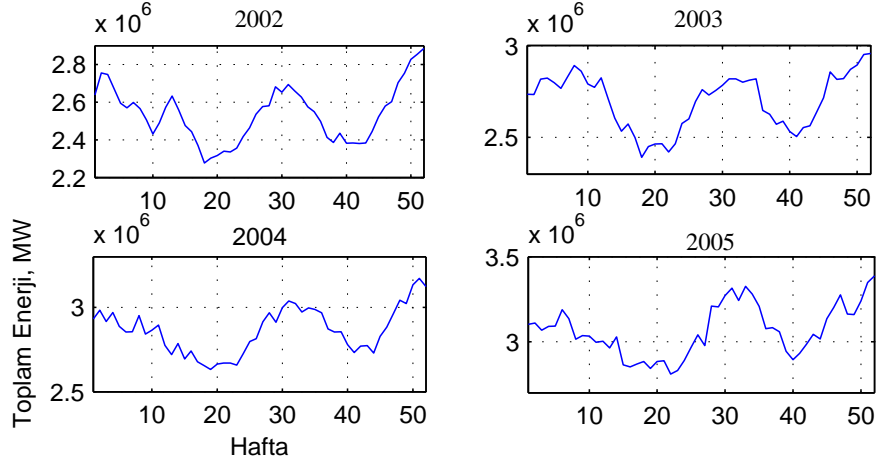
lanılmıştır.

#### 4.1.2 Yük karakteristikleri

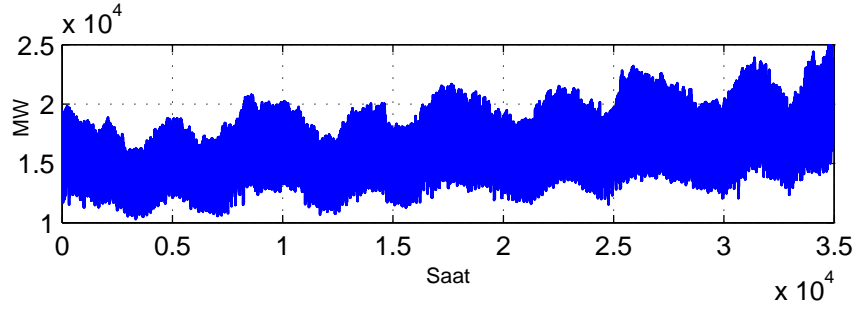
Bu kısımda, Türkiye'deki yük değerlerinin değişimi hakkında bilgiler sunulmuş ve yük değerlerinin 1-B (1-Boyutlu) ve 2-B gösterimi verilmiştir. Saatlik yük verilerini anlamlı bir şekilde kullanabilmek için öncelikle bu veriler analiz edilmeli ve dinamikleri anlaşılmalıdır. Yük değerleri dinamik bir yapıya sahiptir ve benzerlikler göstermektedir. Fakat bunun yanında beklenmedik bazı durumlar, santralin devre dışı kalması, tatil dönemleri, hava koşulları ve diğer bazı etkenler yük değerlerinin değişimini etkilemektedir. Yük değerleriyle ilgili diğer gözlem de sırasıyla haftalık ve yıllık periyotta iki salınım olmasıdır. Bununla beraber yük değerlerinin rastgele olmayan kısımları bir başka deyişle salınımların benzer değişimler gösteren kısımları dalga örnekleri veya matematiksel modeller kullanılarak modellenabilir. Ayrıca, her yıla ait ortalama yük değerleri incelendiğinde, yıllara bağlı olarak yük değerlerinin belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir.

Talep edilen yük değerlerinin yıl içindeki haftalık değişimlerini, talebin en yüksek ve en düşük olduğu zamanları görebilmek amacıyla her haftaya ait toplam enerji değerleri hesaplanmış ve bu haftalara karşılık gelen haftalık toplam enerji değerlerinin 2002-2005 yıllarına ait grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir. Analizler yapılırken ani düşüşleri ortadan kaldırmak amacıyla ara değerlendirme yapılmıştır. Bu ara değerlendirme, ilgili saate ait bir önceki hafta ve bir sonraki haftanın değerlerinin ortalaması alınarak yapılmıştır. Mevsimsel değişimler, Şekil 4.1'den kolaylıkla gözlemlenebilir. Şekilden de görüldüğü gibi, elektrik talebi en fazla kış aylarında olmaktadır. Kış ayları kadar fazla olmasa da Temmuz ve Ağustos aylarında da yük talebi fazladır. Bahar aylarında, özellikle Mayıs ve Haziran aylarında talep edilen yük değeri düşmektedir. Ayrıca, yıllık artışa bağlı olarak talep edilen yük değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Örneğin, 2002 yılında toplam enerjinin tepe değeri 2885127 MW iken, bu değer 2005 yılında 3387354 MW değerine ulaşmıştır.

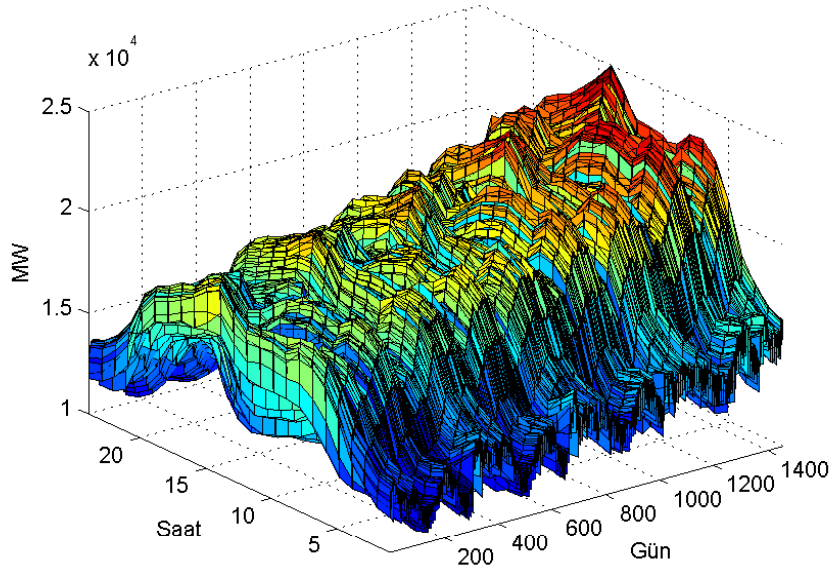
2002-2005 yıllarına ait saatlik yük değerleri Şekil 4.2'de 1-B olarak, Şekil 4.3'te de 2-B olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1: 2002-2005 yılları için her haftaya ait toplam enerji değerleri



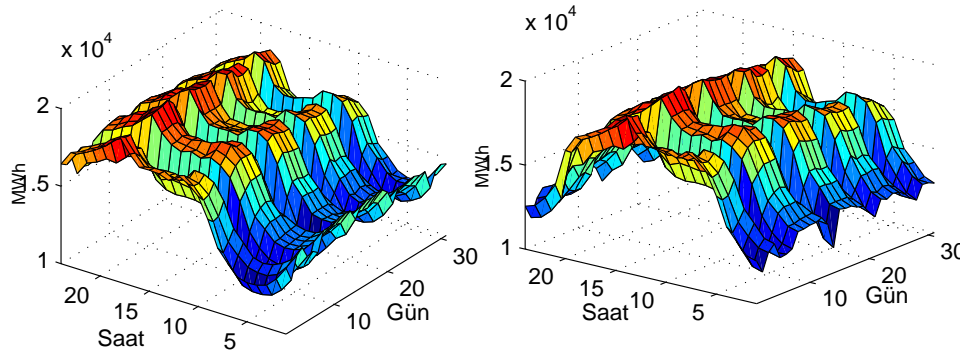
Şekil 4.2: 2002-2005 yıllarına ait saatlik verilerin 1-B gösterimi



Şekil 4.3: 2002-2005 yıllarına ait saatlik verilerin 2-B gösterimi

Yük değerlerinin 2-B gösterilmesinin nedeni, bu gösterimin saate ve güne bağlı değişimleri bir arada sunması; bir başka deyişle kompakt görsellik özelliğine sahip olmasıdır. Şekillerden görüldüğü gibi, 2-B gösterim, yük değerlerinin değişimi hakkında daha fazla görüş ve bilgi içermektedir. Yük değişimlerinin ilintisel olmasından dolayı Şekil 4.2'nin matematiksel modellenmesi fazlasıyla karmaşıktır. Diğer taraftan, 2-B grafikten bir gün içindeki saatlere bağlı değişim 2-B matris gösterimi olacak şekilde ayrılırsa, bu şekli daha az karmaşık modellerle göstermek mümkün olacaktır.

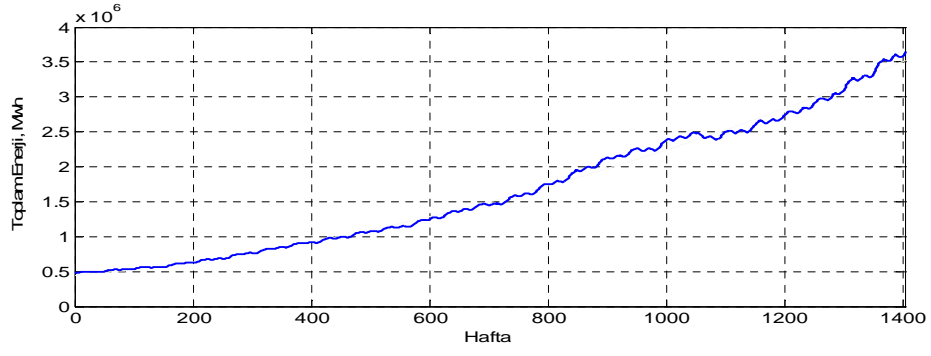
Yük değişimini daha detaylı görebilmek amacıyla, 2002 yılı Ocak ayına ait değişim 2-B olarak Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bir haftaya ait enerji tüketim değerleri analiz edildiğinde, Cumartesi ve özellikle Pazar günlerinde yük değerlerinin değişimlerinin hafta içindeki diğer günlere göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Daha sade bir model elde edebilmek için, başlangıç saatinin sabah 5:00 olduğu düşünülmüştür. Bu saat aynı zamanda talep edilen yük değerinin en az olduğu saate karşılık gelmektedir.



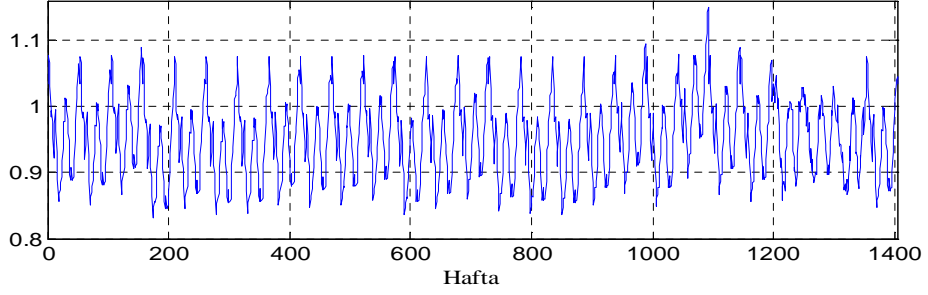
Şekil 4.4: Ocak ayı için saatlik yük değişimleri

#### 4.1.3 Yük değerlerinin modellenmesi

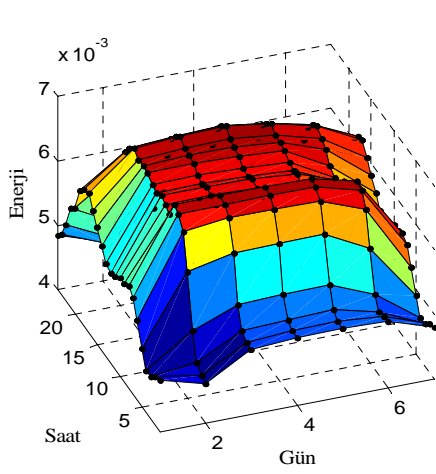
Bu tezde önerilen yöntemde yük değerleri, iç içe geçmiş üç kısım halinde modellenmiştir. İlk kısım yıllık ortalama yük değerlerinin modellenmesidir. İkinci kısım, bir yıl içindeki haftalık artık yük değerlerinin modellenmesidir. Üçüncü kısım ise, bir hafta içindeki saatlik değişimlerin modellenmesidir. Bu model ayrıca, 2-B yüzey fonksiyonu kullanılarak da modellenmiştir. İç içe geçen bu yapı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



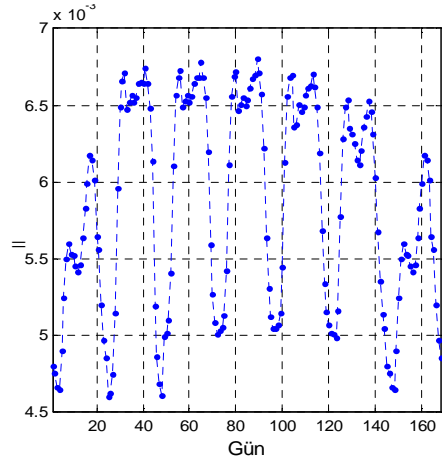
⊕



⊕

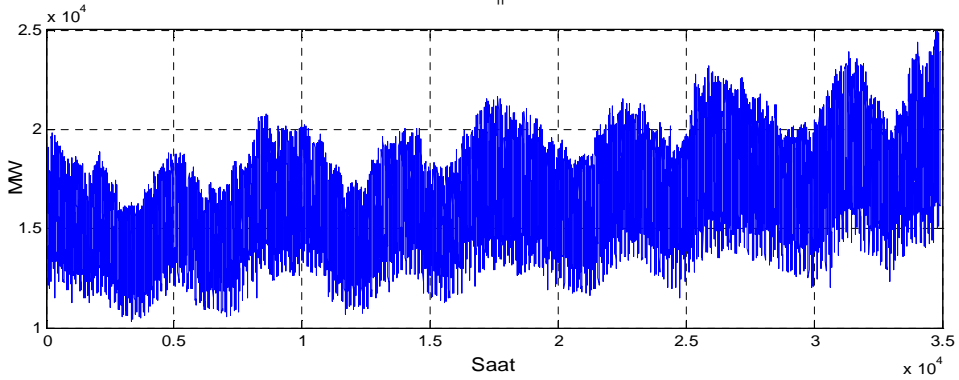


(a)



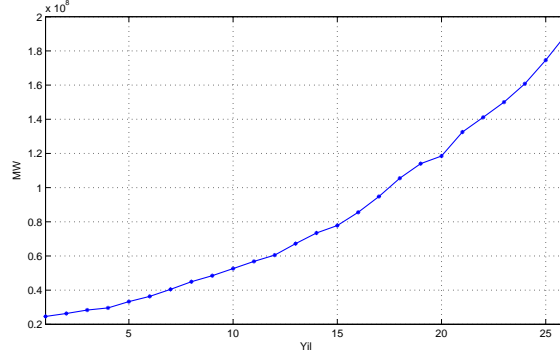
(b)

||



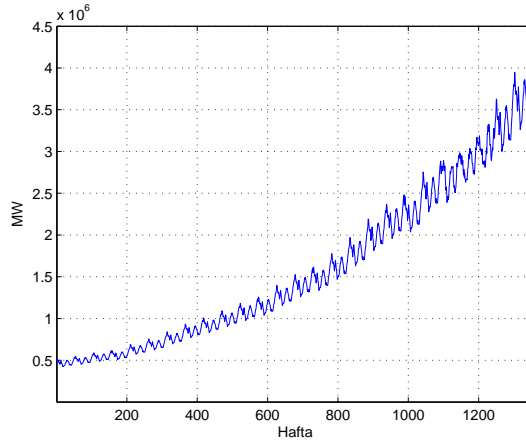
Şekil 4.5: Önerilen yöntemin bölümleri a) Haftalık ekseninde yıllık yük değişimleri b)Haftalık ekseninde haftalık artık yük değişimleri c)(a) 1-B normalize edilmiş saatlik yük değişimleri (b) 2-B normalize edilmiş saatlik yük değişimleri d) Saatlik verilerin 1-B gösterimi (4 yıllık değerler)

**1. Kısım - Yıllık yük değerlerinin modellenmesi:** Yıllık ortalama yük değerlerinin modellenmesi, önerilen yöntemin ilk adımını oluşturmaktadır. Yıl içindeki değişimleri gözlemlemek ve matematiksel modeli belirlemek amacıyla 2002-2005 yıllarına ait saatlik yük değerleri ve 1982-2007 arasındaki yıllık yük değerleri kullanılmıştır. 1982-2007 yıllarına ait yıllık yük değerlerinin değişimleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6: 1982- 2007 yıllarına ait yıllık yük değerleri

1982-2007 yıllarına ait toplam yük değerlerinin grafiği incelendiğinde, yıl içerisindeki değişimler ve yıllara bağlı olarak artışlar görülebilmektedir. Burada, yıllık veriler haftalık çözünürlükte yeniden bulunmuştur. Bu amaçla, 1982-2007 yıllarına ait toplam enerji tüketim değerleri ve 2002 yılına ait saatlik yük değerleri kullanılmıştır. 1982-2007 yıllarına ait toplam enerji değerlerinin grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7: 1982-2007 yıllarına ait toplam enerji modeli (2002-2005 yıllarına ait değerler saatlik gerçek değerlerdir)

Şekil 4.6, yıllara bağlı, Şekil 4.7 ise haftalara bağlı değişimleri göstermektedir. Elektrik enerji talebinin yıllara bağlı olarak arttığı her iki şekilden de görülmektedir. Örneğin toplam enerji değeri 1982 yılının ilk haftasında 523120 MWh iken, 2007 yılının son haftasında bu değer 4140000 MWh olmuştur. Bu grafik doğru bir şekilde modellenilebilirse herhangi bir yılın herhangi bir haftası için talep edilen yük değerleri bulunabilecektir. Şekil 4.7’de gösterilen grafik geniş bantlı bir sinyal olduğundan, model karmaşıklığı az olan uygun bir model ile doğrudan modellemek oldukça zordur. Doğru modelleme yapabilmek için, bu grafik iki kısma ayrılarak incelenebilir. Bu sayede, yıllara bağlı olarak hem sürekli olarak artış gösteren durum (Şekil 4.7) hem de yıl içerisinde oluşan değişimler (salınımlar) modellenilebilecektir (Şekil 4.7 ve Şekil 4.6 arasındaki fonksiyonel fark).  $f(h)$ , yıllık yük değişimleri,  $g(h)$ , Şekil 4.7 ile Şekil 4.6 arasındaki fonksiyonel fark haftalık artık yük değişimlerini göstermektedir. Ortalamalar bir haftalık zaman içerisindeki saatlik verilerin ortalamaları alınarak elde edilmiştir.

Şekil 4.7’yi,  $f(h)$  ve  $g(h)$  olarak ayırabilmek için yürüyen ortalama yöntemi kullanılmıştır. Yıllara bağlı olan değişimler polinom ile yıl içerisindeki değişimler sinüslerin toplamı ve FS olarak ifade edilen farklı iki matematiksel model kullanılarak modellenmiştir. Bu değişimler MATLAB® programında eğri uydurma araç kutusu kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen bu modeller,  $f^m(h)$  ve  $g^m(h)$  olarak adlandırılmıştır. Şekil 4.7’deki fonksiyon  $H(h)$  olarak tanımlanmıştır. Bu durumda  $H(h)$  ve  $H_{(i,j)}^m(h)$  aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

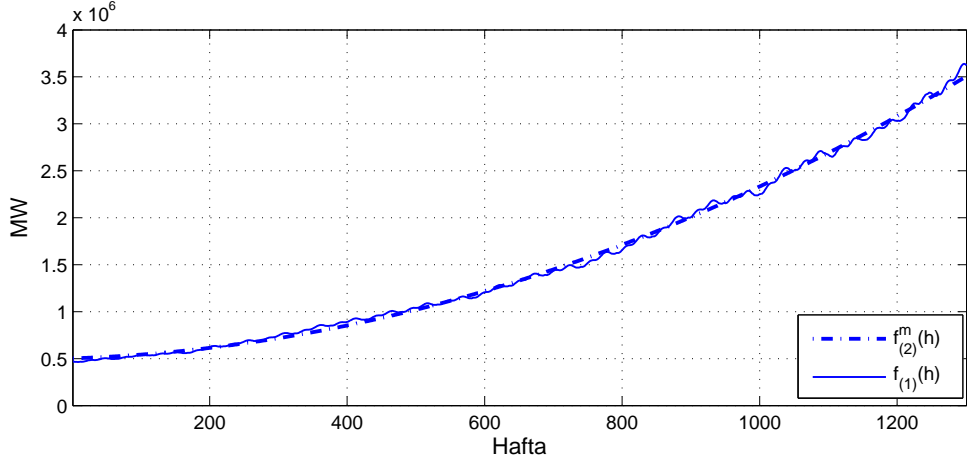
$$H(h) = f(h) \times g(h), h = 1, \dots, 1300 \quad (4.1)$$

Burada  $H_{(i,j)}^m(h)$  şu şekilde tanımlanır:

$$H_{(i,j)}^m(h) = f^m(h) \times g^m(h), i=1,2,3,4 \ \& \ j=1,2 \quad (4.2)$$

$f(h)$  ve  $g(h)$ ’ı farklı şekillerde modellemek mümkündür. Farklı modellerle tanımlama yapmak için  $H_{(i,j)}^m(h)$  gösterimi kullanılmıştır, parantezler ilgili model numarasına karşılık gelmektedir.

**$f(h)$ ’nın modellenmesi:**  $f(h)$  fonksiyonu  $H(h)$ ’nın yıllara bağlı olarak artan kısmını göstermektedir.  $f(h)$ , 2. dereceden bir polinom kullanılarak modellenmiştir. Şekil 4.8’de yıllara bağlı olarak artan fonksiyon ve bu fonksiyon için uydurulan eğrinin grafikleri görülmektedir.



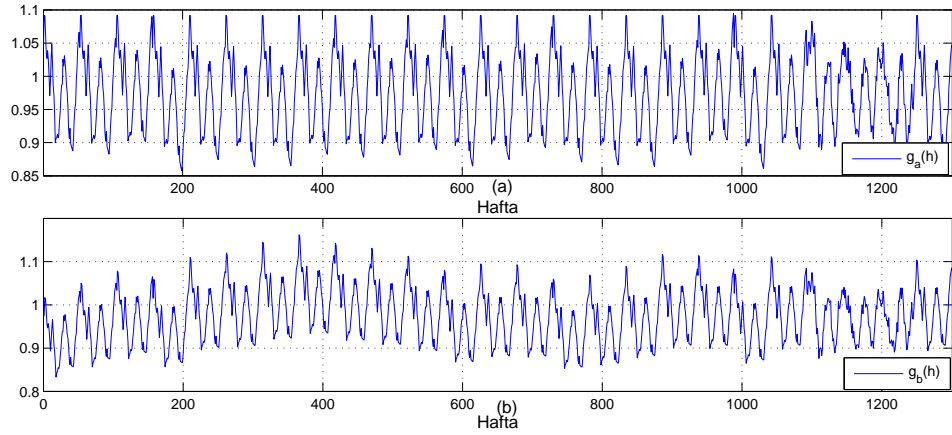
Şekil 4.8: Yıllara bağlı olarak artan fonksiyon ve bu fonksiyon için bulunan model

$f_{(2)}^m(h)$  fonksiyonu aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$f_{(2)}^m(h) = 0.9717h^2 + 830.4h + 436600 \quad (4.3)$$

$f_{(2)}^m(h)$  eşitliğindeki katsayılar %95 sınırlar içindedir.

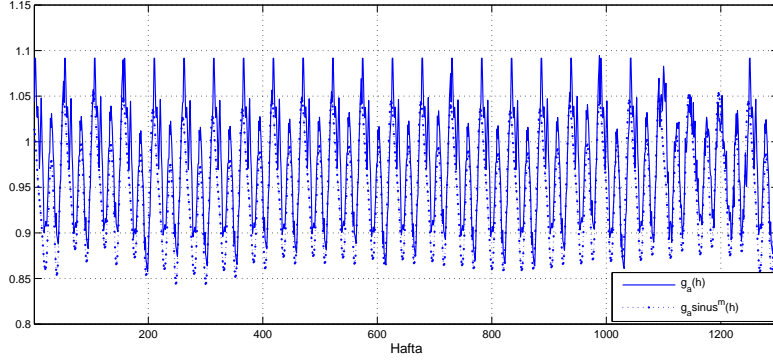
**2. Kısım - Haftalık artık yük değerlerinin modellenmesi:** Haftalık artık yük değerlerinin modellenmesi, önerilen yöntemin ikinci kısmını oluşturmaktadır.  $g(h)$  için en iyi modeli bulabilmek amacıyla iki farklı yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımlar  $g_a(h)$  ve  $g_b(h)$  olarak adlandırılmıştır.  $g_a(h)$ , yıllara bağlı olarak artan fonksiyonun ortalama talep edilen yük değerlerine bölünmesiyle elde edilmiştir.  $g_b(h)$ , yıllık yük değişimleri için bulunan modelin talep edilen yük değerlerine bölünmesiyle elde edilmiştir.  $g_a(h)$  ve  $g_b(h)$  fonksiyonlarının grafikleri Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9: (a)  $g_a(h)$  (b)  $g_b(h)$  fonksiyonlarının grafikleri



$g_a(h)$  ve  $g_b(h)$  fonksiyonlarını görüldüğü gibi polinom türünde fonksiyonlarla modellemek uygun değildir. Bunlar sinüs fonksiyonlarının toplamı ve FS kullanılarak modellenebilir.  $g_a(h)$  fonksiyonu için en uygun modelin sekiz katsayıdan oluşan sinüs fonksiyonları toplamı (onaltı katsayılı FS) ve sekiz katsayıdan oluşan FS olduğu görülmüştür.  $g_a(h)$  ve sekiz katsayılı sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşan modelin (16 katsayılı FS'si) grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.

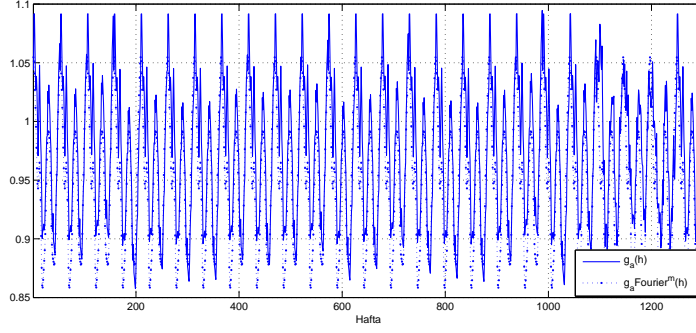


Şekil 4.10:  $g_a(h)$  ve sekiz katsayılı sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşan model ve bu modelin grafiği

$g_a(h)$ 'ın sekiz katsayılı sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşan modelinin fonksiyonu  $g_a \sinus^m(h)$  şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
g_{(1)}^m(h) = g_a \sinus^m(h) = & 1.648 \times \sin(1.1942 \times 10^{-2}h + 0.3196) \\
& + 0.729 \times \sin(3.252 \times 10^{-3}h + 2.624) \\
& + 3.651 \times 10^{-2} \times \sin(8.978 \times 10^{-3}h + 2.176) \\
& + 5.943 \times 10^{-2} \times \sin(0.241h + 0.887) \\
& + 9.16 \times 10^{-3} \times \sin(1.374 \times 10^{-2}h + 1.72) \\
& + 4.054 \times 10^{-2} \times \sin(0.121 + 1.343) \\
& + 3.392 \times 10^{-3} \times \sin(2.162 \times 10^{-2} \times 10^{-2}h - 0.8948) \\
& + 2.942 \times 10^{-2} \times \sin(0.362 \times 10^{-2} \times 10^{-2}h + 2.662)
\end{aligned} \tag{4.4}$$

$g_a \sinus^m(h)$  eşitliğindeki katsayılar %95 sınırlar içindedir.  $g_a(h)$  ve sekiz katsayılı FS'nin toplamından oluşan modelin grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir.

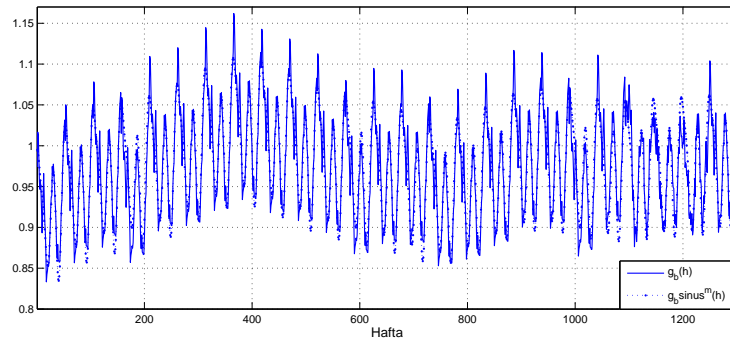


Şekil 4.11:  $g_a(h)$  ve sekiz katsayılı FS'nin toplamından oluşan modelin grafiği

$g_a(h)$ 'ın sekiz katsayılı FS'den oluşan modelinin fonksiyonu ( $g_a^{fourier^m}(h)$ ) şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
 g_{(2)}^m(h) = g_a^{fourier^m}(h) = & 0.948 + 4 \times 10^{-2} \times \cos(0.1208h) \\
 & + 5.007 \times 10^{-3} \times \sin(0.1208h) + 4.441 \times 10^{-3} \times \cos(2 \times 0.1208h) \\
 & + 3.973 \times 10^{-2} \times \sin(2 \times 0.1208h) + 1.142 \times 10^{-2} \times \cos(3 \times 0.1208h) \\
 & - 2.70 \times 10^{-2} \times \sin(3 \times 0.1208h) + 9.195 \times 10^{-3} \times \cos(4 \times 0.1208h) \\
 & + 6.313 \times 10^{-3} \times \sin(4 \times 0.1208h)
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

$g_a^{fourier^m}(h)$  eşitliğinde bulunan katsayılar da %95 sınırlar içindedir.  $g_b(h)$ 'da,  $g_a(h)$ 'a benzer şekilde sekiz katsayıdan oluşan sinüs fonksiyonları toplamı (onaltı katsayılı Fourier katsayıları) ve sekiz katsayılı FS'den oluşan fonksiyonlarla modellenmiştir.  $g_b(h)$  ve sekiz katsayılı sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşan modelin grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir.

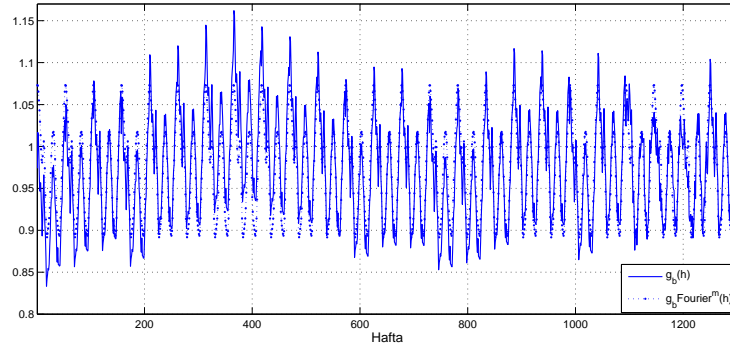


Şekil 4.12:  $g_b(h)$  ve sekiz katsayılı sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşan model

$g_b(h)$ 'ın sekiz katsayılı sinüs fonksiyonlarının toplamından oluşan modelinin fonksiyonu  $g_b \sinus^m(h)$  şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
g_{(3)}^m(h) = g_b \sinus^m(h) = & 1.873 \times \sin(2.27 \times 10^{-3}h - 6.79 \times 10^{-3}) \\
& + 1.162 \times \sin(4.06 \times 10^{-3}h + 1.79) \\
& + 5.736 \times 10^{-1} \times \sin(7.24 \times 10^{-3}h + 2.78) \\
& + 3.36 \times 10^{-1} \times \sin(8.31h \times 10^{-3} + 5.211) \\
& + 5.91 \times 10^{-3} \times \sin(2.41 \times 10^{-1}h + 0.73) \\
& + 3.89 \times 10^{-2} \times \sin(0.121 + 1.05) \\
& + 6.67 \times 10^{-3} \times \sin(2.33 \times 10^{-2} \times 10^{-2}h - 0.89) \\
& + 2.91 \times 10^{-2} \times \sin(0.362 \times 10^{-2} \times 10^{-2}h + 2.57)
\end{aligned} \tag{4.6}$$

$g_b \sinus^m(h)$  eşitliğindeki katsayılar %95 sınırlar içindedir.  $g_b(h)$  ve sekiz katsayılı FS'nin toplamından oluşan modelin grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir.



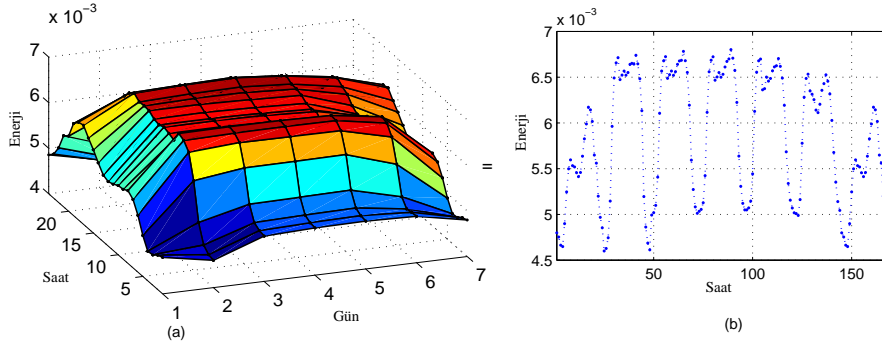
Şekil 4.13:  $g_b(h)$  ve sekiz katsayılı FS'nin toplamından oluşan modelin grafiği

$g_b(h)$ 'ın sekiz katsayılı FS'nin toplamından oluşan modelinin fonksiyonu  $g_b \text{fourier}^m(h)$  şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
g_{(4)}^m(h) = g_b \text{fourier}^m(h) = & 0.973 + 3.55 \times 10^{-2} \times \cos(0.1208h) \\
& + 1.48 \times 10^{-2} \times \sin(0.1208h) + 3.77 \times 10^{-2} \times \cos(2 \times 0.1208h) \\
& + 4.49 \times 10^{-2} \times \sin(2 \times 0.1208h) + 1.31 \times 10^{-2} \times \cos(3 \times 0.1208h) \\
& - 2.63 \times 10^{-2} \times \sin(3 \times 0.1208h) + 8.92 \times 10^{-3} \times \cos(4 \times 0.1208h) \\
& + 6.65 \times 10^{-3} \times \sin(4 \times 0.1208h)
\end{aligned} \tag{4.7}$$

$g_b \text{fourier}^m(h)$  eşitliğindeki katsayılar %95 sınırlar içindedir.

**3. Kısım - Saatlik yük değerlerinin modellenmesi:** Saatlik yük değerlerinin modellenmesi, önerilen yöntemin üçüncü kısmını oluşturmaktadır. Bir yıla ait saatlik düzgün bir model oluşturmak amacıyla, 2002 yılına ait veriler kullanılarak ‘haftalık model’ oluşturulmuştur. Haftalık modeli bulmak için, 52 haftaya ait değerlerin ortalaması alınmıştır. Bir hafta içindeki saatlik grafik ( $24 \times 7 = 168$ ), yılın diğer günlerine benzerlik göstermektedir. Bu 52 haftaya ait aritmetik ortalama, sembolik (nominal) haftalık ortalamayı göstermektedir. Ortalama alınmadan önce, etkin enerji talebini normalize etmek ve bir yıl içinde olan artış ve azalışların etkilerinden sakınmak amacıyla, her haftanın saatlik eğrilerinin toplam enerjisi bir olacak şekilde normalize edilmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan modelin toplam enerjisi bire eşit olmuştur. Normalize edilen saatlik yük değişimlerinin 1-B ve 2-B gösterimi Şekil 4.14’te verilmiştir. Burada ‘haftalık model’ yapısı  $T_{(1)}(s, d)$  olarak adlandırılmıştır.

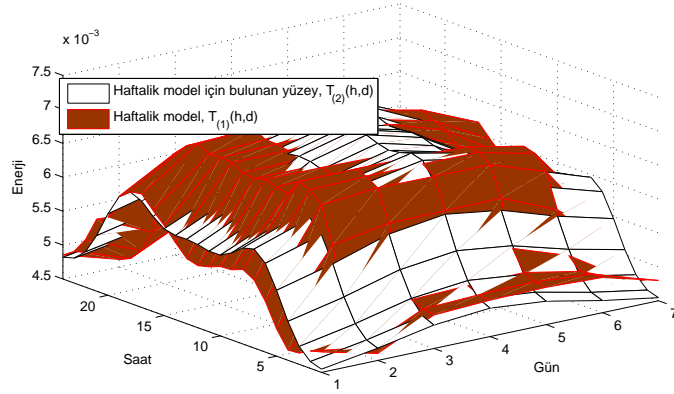


Şekil 4.14: Normalize edilen saatlik yük değişimlerinin (a) 2-B (b) 1-B gösterimi

Haftalık model oluşturulduktan sonra, bu model 2-B ayrık kosinüs dönüşümü (2B-DCT) kullanılarak modellenmiştir. Bu model, en büyük yedi tane katsayıdan ve bu katsayılara ait koordinatlardan oluşmaktadır. Bu amaçla ilk olarak, 2-B ayrık kosinüs dönüşümü alınmıştır. En büyük yedi tane katsayı ve o katsayılara ait koordinatlar bulunmuştur. Son olarak, yedi katsayılı bu modelin ters ayrık kosinüs dönüşümü alınmıştır. Bu durumda sadece yedi katsayı ve onların koordinatlarını bilmek ‘haftalık model’i bulmak açısından yeterlidir. Sonuç olarak, haftalık model fonksiyonu ( $T_{(2)}(s, d)$ ) şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
T_{(2)}(s, d) = & 1.17 \times 10^{-2} \left[ \text{Cos}\left(\frac{\pi(2h+1)}{48}\right) \text{Cos}\left(\frac{\pi(2d+1)}{14}\right) \right] \\
& - 2.06 \times 10^{-4} \left[ \text{Cos}\left(\frac{2\pi(2h+1)}{48}\right) \text{Cos}\left(\frac{\pi(2d+1)}{14}\right) \right] \\
& - 9.86 \times 10^{-4} \left[ \text{Cos}\left(\frac{3\pi(2h+1)}{48}\right) \text{Cos}\left(\frac{\pi(2d+1)}{14}\right) \right] \\
& - 5.71 \times 10^{-4} \left[ \text{Cos}\left(\frac{5\pi(2h+1)}{48}\right) \text{Cos}\left(\frac{\pi(2d+1)}{14}\right) \right] \\
& - 1.38 \times 10^{-4} \left[ \text{Cos}\left(\frac{9\pi(2h+1)}{48}\right) \text{Cos}\left(\frac{\pi(2d+1)}{14}\right) \right] \\
& - 5.40 \times 10^{-4} \left[ \text{Cos}\left(\frac{\pi(2h+1)}{48}\right) \text{Cos}\left(\frac{3\pi(2d+1)}{14}\right) \right] \\
& + 1.85 \times 10^{-4} \left[ \text{Cos}\left(\frac{3\pi(2h+1)}{48}\right) \text{Cos}\left(\frac{3\pi(2d+1)}{14}\right) \right]
\end{aligned} \tag{4.8}$$

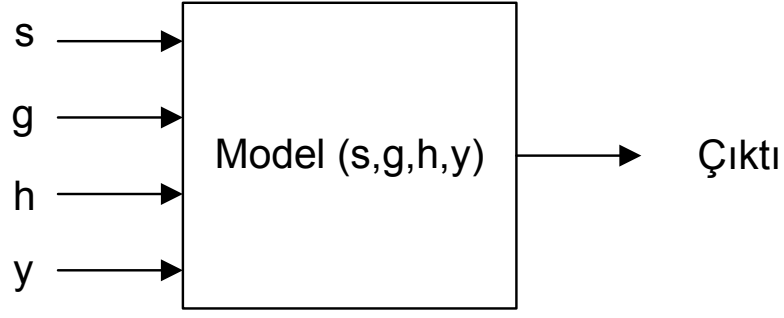
Haftalık model yapısı ve modellenen yüzeyin üst üste çizildiği grafik Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15: Haftalık model yapısı ve modellenen yüzey

#### 4.1.4 Model çıktısının belirlenmesi

Yıllık, haftalık ve saatlik değişimleri için bulunan fonksiyonlar son modelde birleştirilmiştir. Yıllık modelleme için bulunan polinom fonksiyonu, haftalık değişim modeli ile çarpılarak haftalık çözünürlükte yıllık talep fonksiyonu elde edilir. Son olarak, bulunan bu fonksiyon saatlik çözünürlükteki veri ile çarpılarak istenilen saat, gün veya yıl için talep edilen yük değeri bulunabilir. Saatlik, günlük, haftalık ve yıllık giriş değerlerinden oluşan sistemin temel yapısı Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16: Önerilen yaklaşımın temel yapısı

Farklı fonksiyonlar için model çıktısı aşağıdaki eşitlik ile bulunur. Bu eşitlikte  $y$  yılı,  $h$  haftayı,  $s$  saati,  $g$  günü göstermektedir.

$$L_{(i,j)(s,g,h,y)}^m = H_{(i,j)}^m(((y-1) - 1983) \times 52 + h) \times T_{(j)}(s, d) \quad (4.9)$$

Bu eşitlikte  $H_{(i,j)}^m$  eşitlik (4.1)'de ve  $g_{(i)}^m(h)$  eşitlik (4.4) ve (4.7) arasında tanımlanmıştır.  $f_{(j)}(h)$ 'da Şekil 4.8'de,  $T_{(j)}(s, d)$  Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

Gerçek yük verileri  $L(s, g, h, y)$  olarak isimlendirilmiştir. Önerilen yöntem ile saatlik olarak yük değişimlerini bulabilecek, uzun dönemli bir yük tahmini analizi yapılmıştır.

#### 4.1.5 Matematiksel model için uygulama ve sonuçlar

Önerilen model 2002-2005 yıllarından oluşan gerçek verilere uygulanarak hata değerleri bulunmuştur. RMSE ve MAPE sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{SGHY} \sum_{y=1}^Y \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^Y \sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^S (L(s, g, h, y) - L^m(s, g, h, y))^2} \quad (4.10)$$

$$MAPE = \frac{1}{SGHY} \sum_{y=1}^Y \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^Y \sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^S \frac{|L(s, g, h, y) - L^m(s, g, h, y)|}{L^m(s, g, h, y)} \times \%100 \quad (4.11)$$

$L(s, g, h, y)$ , gerçek yük değerlerini,  $L^m(s, g, h, y)$ , tahmin edilen yük değerlerini göstermektedir. Yıllara göre yük değerleri arttığından dolayı, daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek için normalize edilen RMSE cinsinden de hata değerleri bulunmuştur. Normalize edilen RMSE, RMSE değerinin, her yılın ortalama yük değerine bölünmesiyle bulunmuştur. Hata ölçümleri zaman başlangıcından zamanın sonuna kadar sürer. Bu durumda dört yıl için SGHY

(SaatGünHaftaYıl) =  $24 \times 7 \times 52 \times 4 = 34944$ . 2002-2005 yılları için farklı modeller kullanılarak bulunan MAPE, RMSE ve normalize edilen RMSE değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: 2002-2005 yılları için farklı modellerde MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri

$L_{(i,j)}^m$				
i	j	MAPE (%)	RMSE	Normalize edilen RMSE
1	1	6.13	1411.1	58.795
2	1	6.39	1455.0	60.625
3	1	5.74	1373.3	57.220
4	1	5.77	1383.4	57.625
1	2	7.70	1624.3	67.679
2	2	8.01	1687.7	70.231
3	2	7.28	1550.5	64.604
4	2	7.29	1558.4	64.933

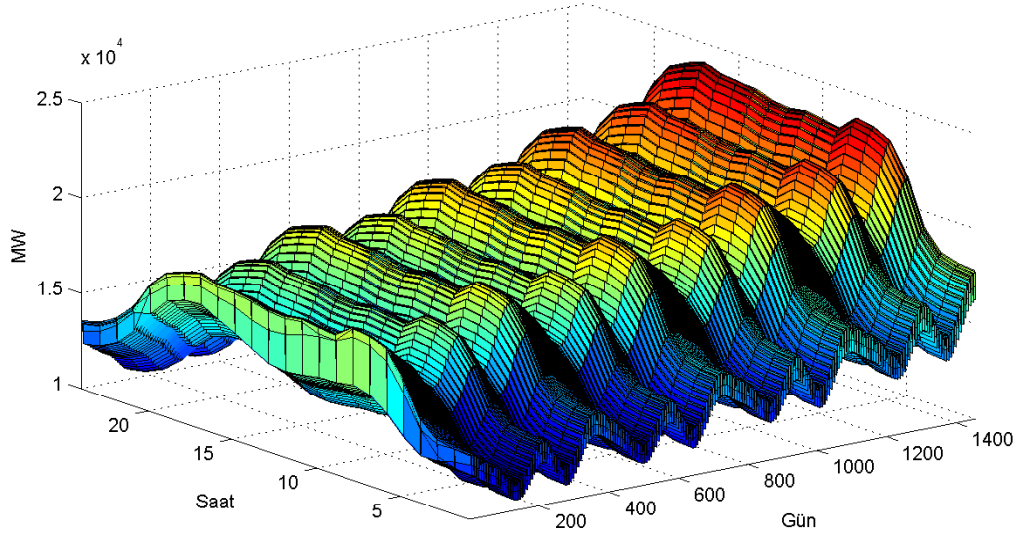
Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi, MAPE, RMSE ve normalize edilen RMSE değeri en küçük  $L_{(3,1)}^m$  modeli için bulunmuştur. Daha detaylı analizler en az hata değerine sahip olan bu model için yapılmıştır. 2002 yılına ait saatlik veriler eğitim verisi olarak düşünülerek, 2002-2005 yıllarına ait hata değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Eğitim ve test verileri için MAPE and RMSE değerleri

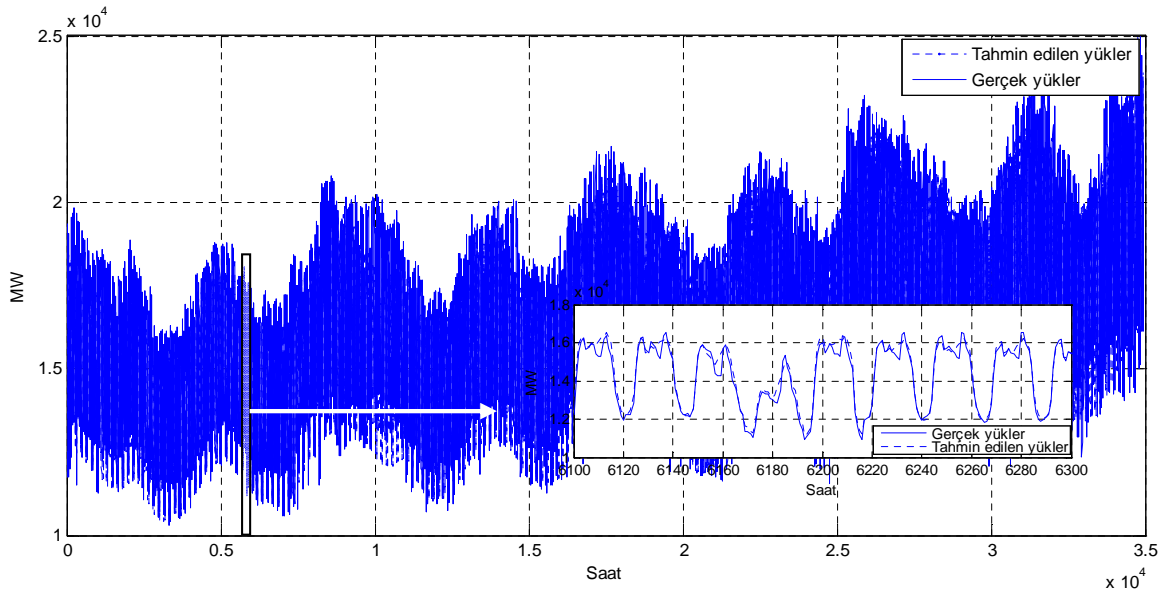
Eğitilen veri	Test verisi	Test verisi	Test verisi	Test verisi
2002	2002	2003	2004	2005
MAPE	3.030	5.740	6.900	7.300
RMSE	613.8	1274	1560	1763

Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi, yıl değerlerine bağlı olarak, eğitim verisinden uzaklaştıkça hata değeri yavaşça artmaktadır. Fakat hata değerlerinin saatlik olarak ele alındığı düşünülürse bu hata değerlerinin uygun değerler arasında olduğu görülür.

2002-2005 yıllarına ait  $L_{(3,1)}^m$  modelinden elde edilen 2-B yüzey model çıktısının grafiği Şekil 4.17’de görülmektedir.  $L_{(3,1)}^m$  modelinden 2002-2005 yılları için bulunan çıktı ve gerçek veri 1-B olarak aynı grafikte, Şekil 4.18’de verilmiştir.



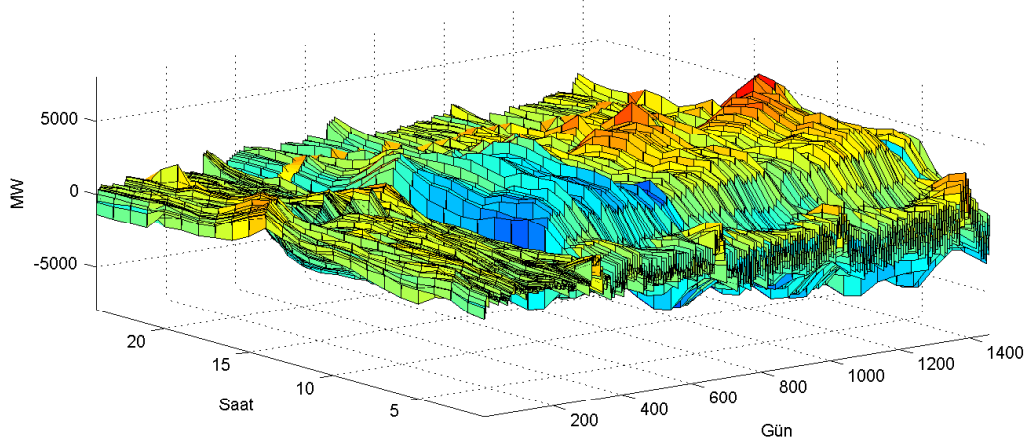
Şekil 4.17: 2002-2005 yılları için  $L_{(3,1)}^m$  modeliden elde edilen yüzey çıktısı



Şekil 4.18: 2002-2005 yılları için gerçek yük ve  $L_{(3,1)}^m$  modeliden bulunan yük değerleri (MAPE = % 5.74, RMSE= 1373.3, normalize edilen RMSE= 57.220)

Şekil 4.19'da ise bu yıllara ait hata grafiği verilmiştir. Hata değerlerine bakıldığında bu değerinin 6000 MW'den daha düşük olduğu görülmektedir. Gerçek yük değerlerinin ise 20000 MW civarında olduğu gözlemlenmektedir.





Şekil 4.19: 2002-2005 yılları için  $L^m_{(3,1)}$  modelinden elde edilen hata yüzeyi

Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te 2002-2005 yılları için MAPE, RMSE ve normalize edilen RMSE değerleri haftalık, aylık ve yıllık olarak verilmiştir.

Çizelge 4.3: 2002-2005 yılları için haftalık farklı modellerde MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri

$L^m_{(i,j)}$				
i	j	MAPE (%)	RMSE	Normalize edilen RMSE
1	1	2.69	90233.0	537.101
2	1	3.35	109560	652.148
3	1	1.87	70250.0	418.154
4	1	1.98	75630.0	450.178
1	2	3.76	120400	716.666
2	2	4.59	140380	835.595
3	2	2.65	86590.0	515.416
4	2	2.74	90270.0	537.321

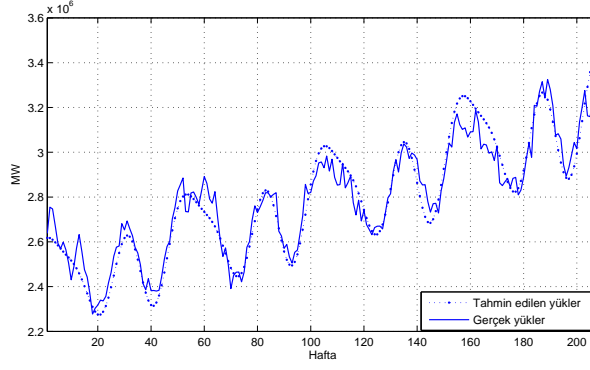
Çizelge 4.4: 2002-2005 yılları için aylık farklı modellerde MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri

$L_{(i,j)}^m$				
i	j	MAPE (%)	RMSE	Normalize edilen RMSE
1	1	2.48	345400	479.722
2	1	3.11	434540	603.527
3	1	1.50	237800	330.277
4	1	1.59	264300	367.083
1	2	3.67	489800	680.277
2	2	4.52	593440	824.222
3	2	2.40	333100	462.638
4	2	2.50	348250	483.680

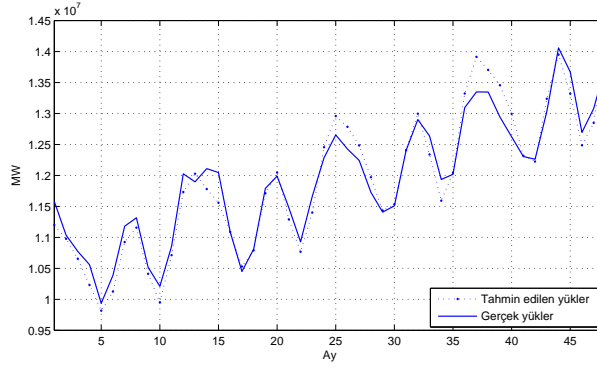
Çizelge 4.5: 2002-2005 yılları için yıllık farklı modellerde MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri

$L_{(i,j)}^m$				
i	j	MAPE (%)	RMSE	Normalize edilen RMSE
1	1	1.84	2962600	339.125
2	1	2.74	4026300	460.885
3	1	0.94	1394900	159.672
4	1	0.73	1082900	123.958
1	2	3.50	5143000	588.713
2	2	4.39	6339000	725.618
3	2	1.95	3056000	349.816
4	2	1.84	2815700	322.309

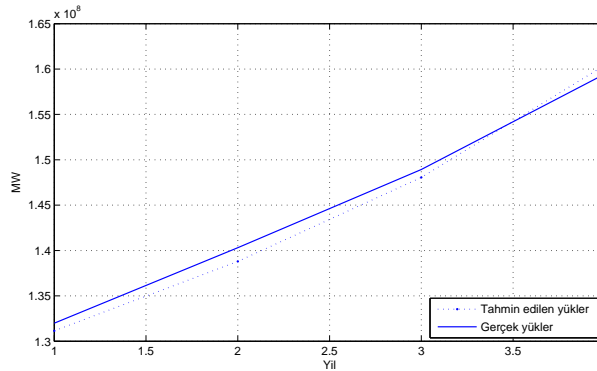
Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22’de 2002-2005 yılları için  $L_{(3,1)}^m$  modelinden bulunan çıktı ve gerçek veri haftalık, aylık ve yıllık 1-B olarak aynı grafiklerde çizdirilmiştir.



Şekil 4.20:  $L_{(3,1)}^m$  modelinden bulunan haftalık model çıktısı ve gerçek yük değerlerinin 1-B'lu gösterimi (MAPE = % 1.87, RMSE= 70250, normalize edilen RMSE= 418.154)

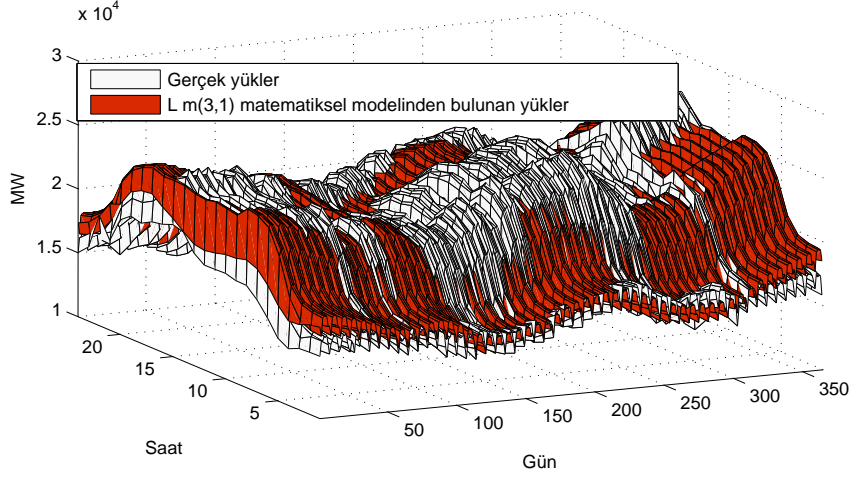


Şekil 4.21:  $L_{(3,1)}^m$  modelinden bulunan aylık model çıktısı ve gerçek yük değerlerinin 1-B'lu gösterimi (MAPE = %1.50, RMSE= 237800, normalize edilen RMSE= 330.277)

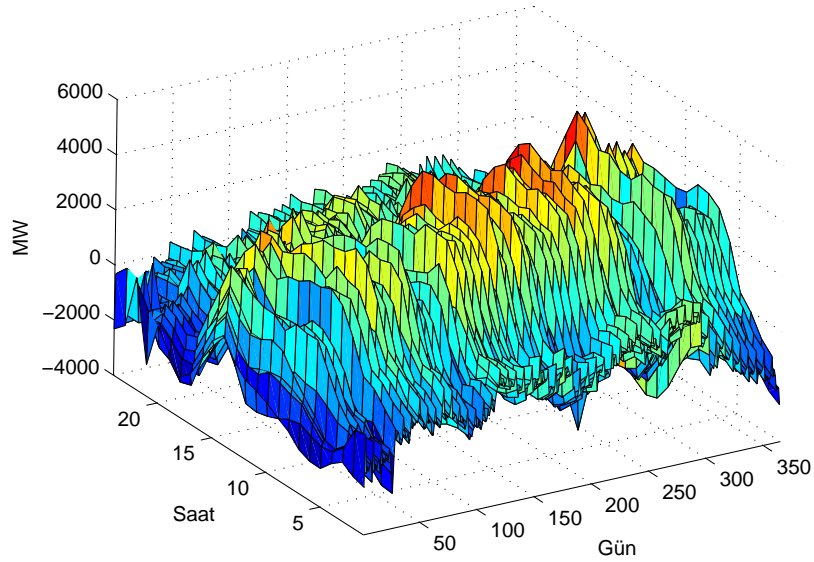


Şekil 4.22:  $L_{(3,1)}^m$  modelinden bulunan yıllık model çıktısı ve gerçek yük değerlerinin 1-B'lu gösterimi (MAPE = %0.73, RMSE= 1082900, normalize edilen RMSE= 123.958)

Önerilen matematiksel modelden 2006 yılı için bulunan yük değerleri ve bu yıla ait gerçek yük değerleri Şekil 4.23'te üst üste çizdirilmiştir. Bu durum için hata grafiği de Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.23: 2006 yılı için gerçek yük ve  $L_{(3,1)}^m$  modelinden bulunan yük değerleri (MAPE = % 4.89, RMSE= 1324.2)

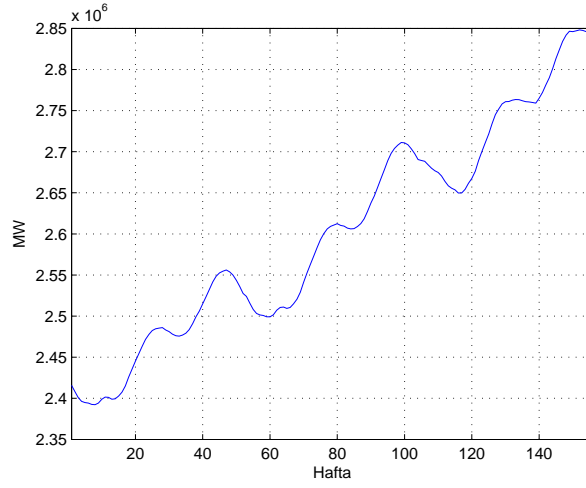


Şekil 4.24: 2002-2005 yılları için  $L_{(3,1)}^m$  modelinden elde edilen hata yüzeyi

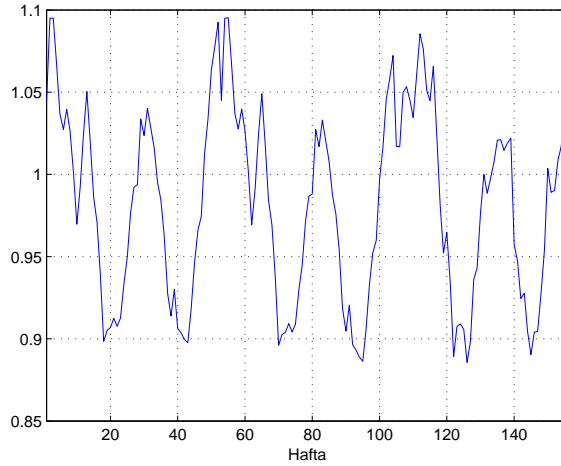
#### 4.1.6 Yük tahmininde matematiksel yaklaşım ve yapay sinir ağları yönteminin karşılaştırılması

Önerilen matematiksel yaklaşımın başarısını görebilmek amacıyla, 2002-2005 yıllarına ait saatlik gerçek veriler kullanılarak bu durum için ayrıca matematiksel fonksiyonlar bulunmuş ve YSA yaklaşımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır [105–106].

Bu kısımda matematiksel yöntem ve YSA yaklaşımları için 2002-2004 verileri eğitim amaçlı kullanılmış ve 2005 yılına ait veriler test amaçlı kullanılmıştır. Bu durum için yıllık yük değişimi ve haftalık artık yk değerlerinden oluşan grafikler Şekil 4.25 ve 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.25: Yıllık yük değişimi grafiği



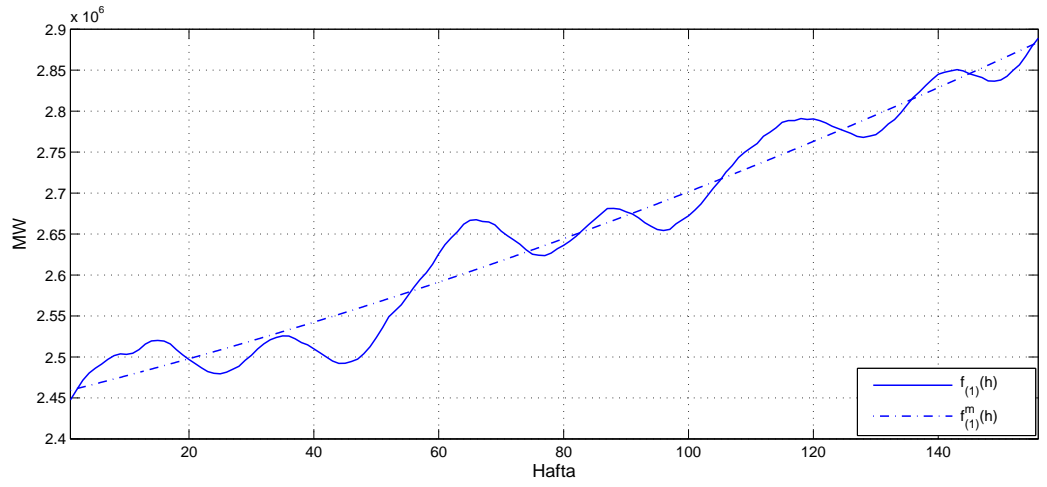
Şekil 4.26: Haftalık artık yük değerleri grafiği

$H_{(k,l)}^m(h)$  şu şekilde tanımlanabilir:

$$H_{(k,l)}^m(h) = f_k^m(h) \times g_l^m(h), k = 1, 2, 3 \& l = 1, 2 \quad (4.12)$$

$H^m(h)$ 'nin artan kısmı  $f_{(1)}(h)$ , ikinci derece polinom ile modellenenir.  $f_{(1)}(h)$  ve modelinin grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir. Modellenen fonksiyon  $f_{(1)}^m(h)$  şu şekildedir:

$$f_{(1)}^m(h) = 2.53 \times h^2 + 1.916 \times 10^3 \times h + 2.457 \times 10^6 \quad (4.13)$$



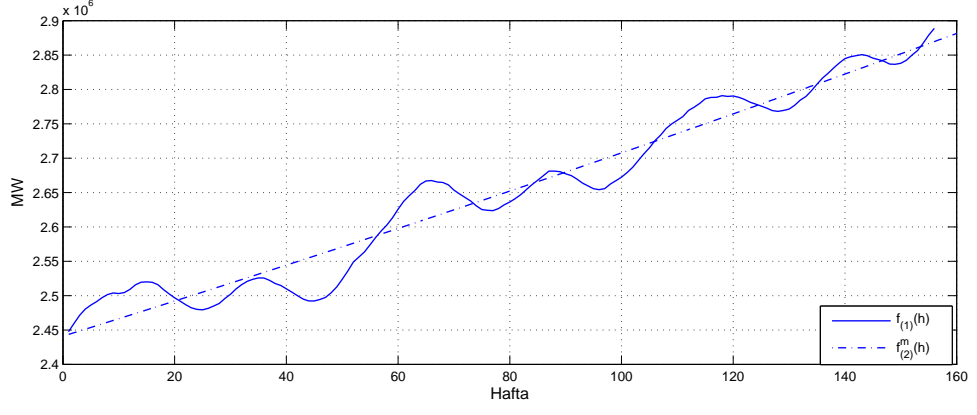
Şekil 4.27: Gerçek yük değerleri ve polinom modeli

Daha uygun yaklaşımları araştırmak amacıyla,  $f_{(1)}(h)$  aynı zamanda  $f_{(2)}^m(h)$  ve  $f_{(3)}^m(h)$  olarak adlandırılan üstel fonksiyonlarla modellenmiştir.  $f_{(2)}^m(h)$  ve  $f_{(3)}^m(h)$  aşağıda verilmiştir:

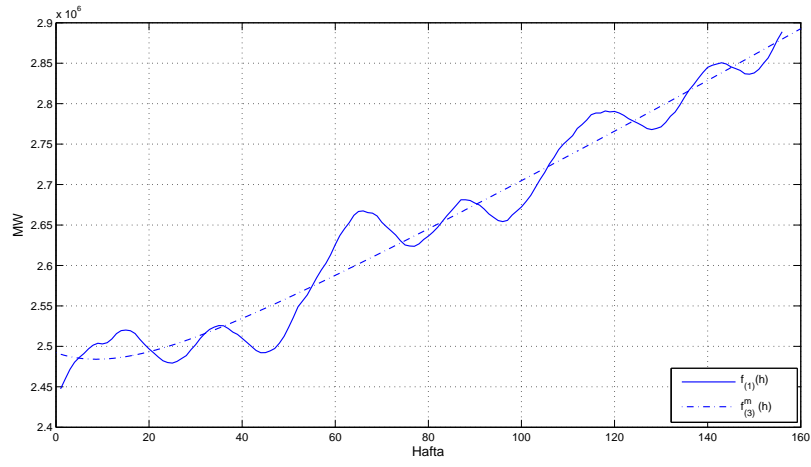
$$f_{(2)}^m(h) = 2.441 \times 10^6 e^{-0.00104h} \quad (4.14)$$

$$f_{(3)}^m(h) = 7.39 \times 10^4 e^{-0.0654h} + 2418000 e^{0.00112h} \quad (4.15)$$

$f_{(1)}(h)$  ve  $f_{(2)}^m(h)$ 'nin grafiği Şekil 4.28'de,  $f_{(1)}(h)$  ve  $f_{(3)}^m(h)$ 'nin grafiği Şekil 4.29'da verilmiştir.

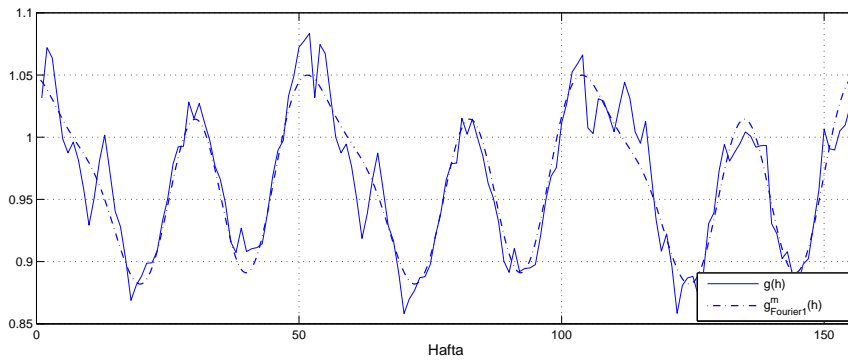


Şekil 4.28: Gerçek yük değerleri ve birinci üstel fonksiyon modeli

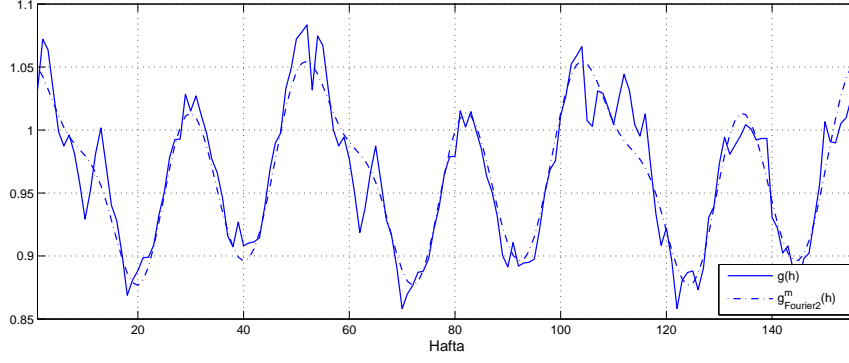


Şekil 4.29: Gerçek yük değerleri ve ikinci üstel fonksiyon modeli

Haftalık artık yük değerleri altı ve sekiz katsayılı FS kullanılarak modellenmiştir.  $g(h)$  ve  $g_{Fourier1}^m(h)$  Şekil 4.30'da,  $g(h)$  ve  $g_{Fourier2}^m(h)$  Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.30: Altı katsayılı FS modeli



Şekil 4.31: Sekiz katsayılı FS modeli

$g_{Fourier1}^m(h)$  ve  $g_{Fourier2}^m(h)$  fonksiyonları sırasıyla şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
g_{(1)}^m(h) = g_{Fourier1}^m(h) = & 0.9647 + 3.82 \times 10^{-1} \times \cos(0.1202h) \\
& -1.611 \times 10^{-3} \times \sin(0.1202h) + 4.38 \times 10^{-2} \times \cos(2 \times 0.1202h) \\
& +3.48 \times 10^{-2} \times \sin(2 \times 0.1202h) + 2.12 \times 10^{-3} \times \cos(3 \times 0.1202h) \\
& -2.98 \times 10^{-2} \times \sin(3 \times 0.1202h) \quad (4.16)
\end{aligned}$$

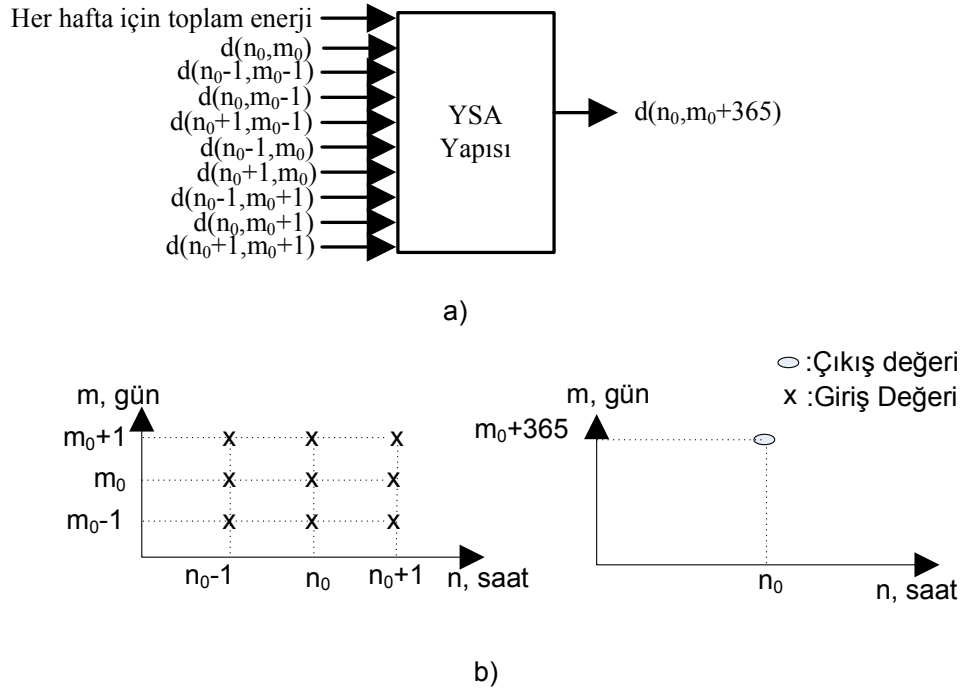
$$\begin{aligned}
g_{(2)}^m(h) = g_{Fourier2}^m(h) = & 0.964 + 3.81 \times 10^{-1} \times \cos(0.1203h) \\
& -1.230 \times 10^{-3} \times \sin(0.1203h) + 4.31 \times 10^{-2} \times \cos(2 \times 0.1203h) \\
& +3.58 \times 10^{-2} \times \sin(2 \times 0.1203h) + 3.19 \times 10^{-3} \times \cos(3 \times 0.1203h) \\
& -2.97 \times 10^{-2} \times \sin(3 \times 0.1203h) + 5.25 \times 10^{-3} \times \cos(4 \times 0.1203h) \\
& +7.0 \times 10^{-4} \times \sin(4 \times 0.1203h) \quad (4.17)
\end{aligned}$$

$f_{(1)}^m(h)$ ,  $f_{(2)}^m(h)$ ,  $f_{(3)}^m(h)$ ,  $g_{Fourier1}^m(h)$  ve  $g_{Fourier2}^m(h)$  eşitliklerindeki katsayılar %95 sınırlar içindedir. Model çıktısı aşağıda verilen eşitlik ile bulunabilir:

$$L_{(k,l)(s,g,h,y)}^m = H_{(k,l)}^m(((y-1) - 2002) \times 52 + h) \times T(s, d) \quad (4.18)$$

Bulunan yıllık ve haftalık yük değerleri modelleri önerilen yaklaşıma uygun olarak, 'haftalık model' ile çarpılarak model çıktısı bulunmuştur. Matematiksel modeli YSA yöntemiyle karşılaştırmak için, YSA yapısı Şekil 4.32(a)'da verildiği gibi önerilmiştir. Giriş/Çıkış yapısı Şekil 4.32(b)'de detaylı olarak gösterilmiştir.





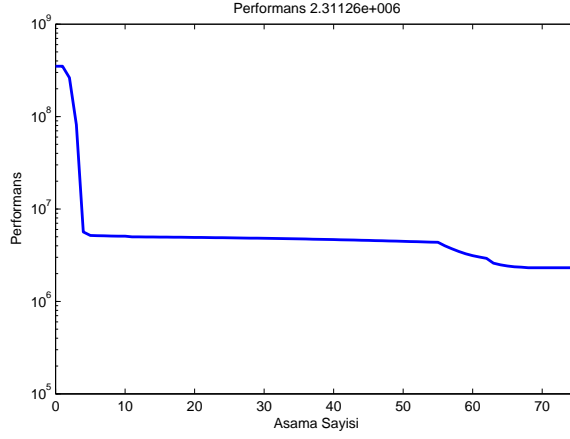
Şekil 4.32: (a) Önerilen YSA yapısı (b) Önerilen YSA için Giriş/Çıkış yapısı

Matematiksel model ile bulunan farklı fonksiyonlar, üç farklı YSA yapısı ile karşılaştırılmıştır. YSA yapısı 10 giriş ve 1 çıkıştan oluşmaktadır. Girişlerden biri, her haftaya karşılık gelen toplam enerji değerleridir. Diğer girişler ise, tahmin edilen değer komşuluğundaki değerlerdir. Önceki yıla ait saatlik parametreler giriş verisi olarak alınmış ve istenilen yılın istenilen saati çıkış verisi olarak alınmıştır.

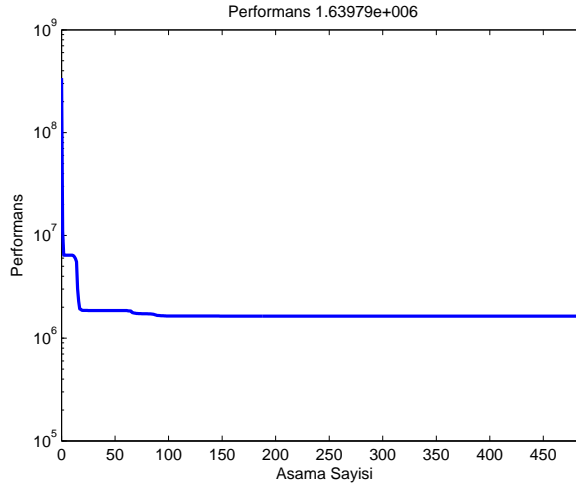
YSA yapılarının ilki iki katmandan oluşmaktadır. Transfer fonksiyonu doğrusal olarak seçilmiştir. Ağ tipi ileri beslemeli geri yayımlı (Feed Forward Back Propagation-FFBP) olarak seçilmiştir. İkinci YSA yapısı da iki katmandan oluşmaktadır. Ağ tipi zaman gecikmeli geri yayımlı (Time Delay Back Propagation-TTBP) olarak seçilmiştir. Transfer fonksiyonu log sigmoid'tir. Üçüncü YSA yapısı, üç katmandan oluşmaktadır. İlk katmanda 10 nöron, ikinci katmanda 5 nöron ve üçüncü katmanda bir nöron bulunmaktadır. İkinci yapıda olduğu gibi bu yapı içinde, transfer fonksiyonu log sigmoid seçilmiştir. Hızlı yakınsamasından dolayı üç yapı için de öğrenme algoritması olarak Levenberg-Marquard kullanılmıştır.

YSA analizleri yapılırken, ağ yapısının parametrelerinin eğitim aşamasında 2002 yılı verileri kullanılarak, 2003 yılı verileri tahmin edilmiş ve daha sonra 2003

yılı verileri giriş verileri olarak alınmış ve 2004 yılı tahmin edilmiştir. Son olarak 2004 yılı verileri giriş verisi olarak alınmış ve 2005 yılı tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değerler gerçek yük değerleriyle karşılaştırılmış ve performans değerleri bulunmuştur. Kullanılan YSA yapılarının performanslarının aşama sayısına göre değişimleri Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te verilmiştir. YSA yapılarından ilki, 75 aşamada, ikincisi 487 aşamada, üçüncüsü ise 33 aşamada eğitilmiştir.

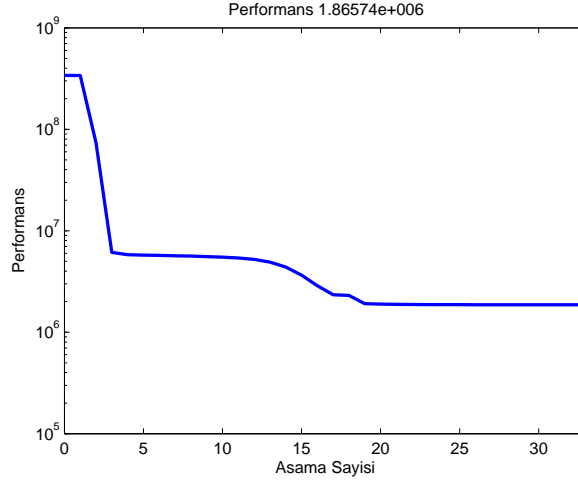


Şekil 4.33: 2005 yılı için performansın aşama sayısına göre değişimi (Birinci YSA yapısı)



Şekil 4.34: 2005 yılı için performansın aşama sayısına göre değişimi (İkinci YSA yapısı)

2002-2004 yılları eğitim, 2005 yılı test verisi olarak seçildiği durumda farklı matematiksel modeller ve YSA yapıları için bulunan MAPE, RMSE ve normalize edilen RMSE değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

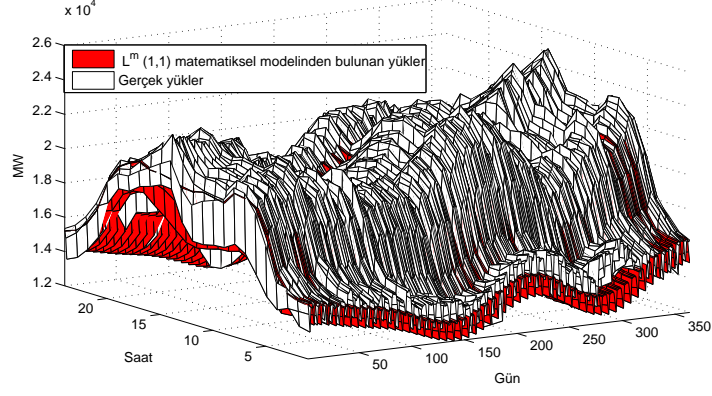


Şekil 4.35: 2005 yılı için performansın aşama sayısına göre değişimi (Üçüncü YSA yapısı)

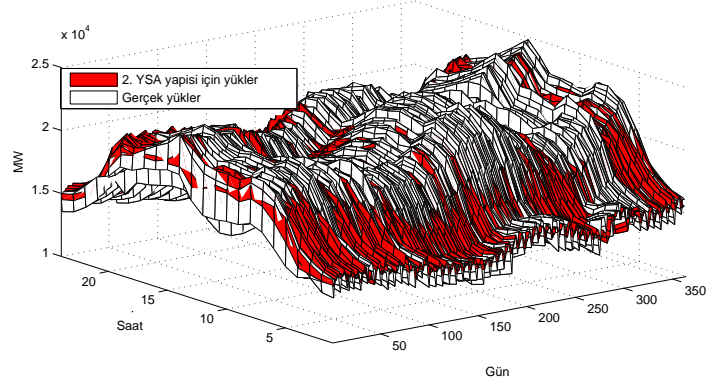
Çizelge 4.6: Farklı matematiksel modeller ve YSA yapıları için MAPE, RMSE, normalize edilen RMSE değerleri

Yöntem	$L_{(k,l)}^m$				
	k	l	MAPE (%)	RMSE	Normalize edilen RMSE
Mat. model	1	1	8.78	2051.8	85.49
	1	2	8.80	2057.2	85.71
	2	1	9.36	2163.7	90.15
	2	2	9.37	2168.4	90.35
	3	1	9.05	2105.5	87.73
	3	2	9.07	2108.4	87.85
YSA	1. YSA yapısı		5.87	1521.9	63.41
	2. YSA yapısı		5.38	1282.3	53.43
	3. YSA yapısı		5.71	1367.8	56.99

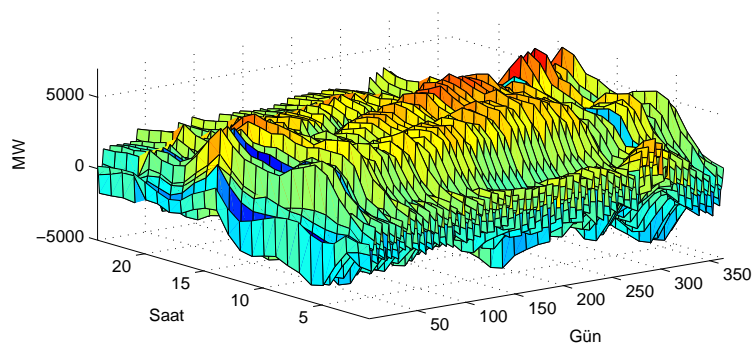
Matematiksel modeller arasında en küçük MAPE, RMSE ve normalize edilen RMSE değeri  $L_{(1,1)}^m$  modeli için bulunmuştur. YSA yapıları arasında ikinci yapı en düşük hata değerini vermiştir. Bundan dolayı 2005 yılı için  $L_{(1,1)}^m$ 'den ve ikinci YSA yapısından bulunan 2-B'lu analitik modelin ve tahmin edilen yüzeyin üst üste çizildiği grafikler sırasıyla Şekil 4.36 ve 4.37'de görülmektedir. Şekil 4.38 ve 4.39'da ise sırasıyla hata grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.36: 2005 yılı için  $L^m_{(1,1)}$  matematiksel modelinden bulunan yüzey çıktısı

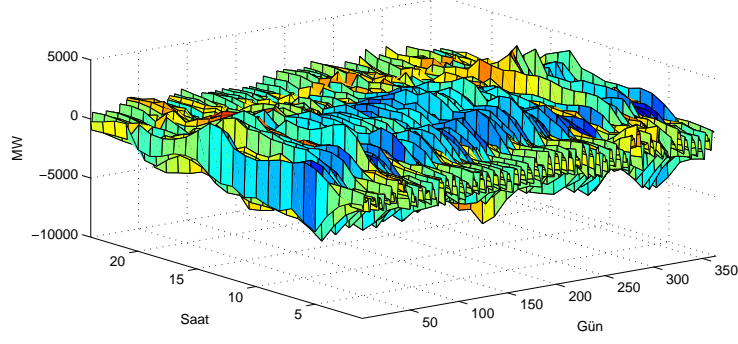


Şekil 4.37: 2005 yılı için ikinci YSA yapısı kullanılarak bulunan yüzey çıktısı



Şekil 4.38: 2005 yılı için  $L^m_{(1,1)}$  matematiksel modelinden bulunan hata yüzeyi

Kullanılan bu iki yöntemin yük tahmini problemine yaklaşımları farklıdır. Matematiksel yaklaşım, yük değerlerinin davranışına göre genel ve kesin matematiksel bir formülasyon verir. Diğer taraftan, YSA yaklaşımı çözümü



Şekil 4.39: 2005 yılı için ikinci YSA yapısından bulunan hata yüzeyi

zor değişimleri başarılı bir şekilde çözer. Bundan dolayı özel yük profilini gerçekleştirmek için uygundur. Çizelge 4.6'dan görüldüğü gibi, matematiksel model ve YSA'nın MAPE ve RMSE değerleri arasında fark vardır. Bu iki yöntemin, bu değerlerinin arasında fark olmasına rağmen bu iki yaklaşımın birbirine göre üstün olan ve olmayan yanları vardır. Sonuçlardan görülmektedir ki, matematiksel modelin MAPE değeri hala önemli derecede düşüktür. Üstelik matematiksel model uzun dönem (gerçekte, isteğe bağlı olarak daha uzun) tahminler yapar. Oysa YSA yaklaşımı, sürekli olarak bir önceki yılın verisine gereksinim duyar. Bu iki yaklaşım da, yük tahmini problemi için (daha önceden yapılmamış) bir çözüm sunmaktadır.

## 4.2 Birim Yüklenme Problemi Uygulamaları

Birim yüklenme problemi ile yük tahmini analizi birlikte kullanılarak birimler arasında optimum yüklenme sağlanabilir. Bu bölümde birim yüklenme problemi için yapılan uygulamalar sunulmuştur. Birimler arasında optimum yüklenmeyi sağlamak amacıyla yapılan çalışmalar ve sonuçları detaylı olarak 4.3 bölümünde sunulmuştur. Birim yüklenme problemi dört birimden oluşan Tunçbilek termik santrali ve on ile yüz birim arasında değişen farklı sistemler için farklı kısıtlar altında çözülmüştür. Çözüm için ilk önce, matematiksel yöntemlerden, gevşetilmiş Lagrange, ceza fonksiyonları, genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, MSG ve F-MSG yöntemleri kullanılmıştır. Daha sonra, akıllı sezgisel yaklaşımlardan bulanık mantık ve benzetimli tavlama yöntemleri de kullanılarak çözüm yapılmıştır. Birim yüklenme problemi üç farklı durum için çözülmüştür:

- **1. durum:** ÜYK, BM ve yük dengesi kısıtları ele alınarak yapılan birim yüklenme çalışmaları
- **2. durum:** ÜYK, BM, KPM, yük dengesi, dönme rezervi ve en küçük devreye giriş-çıkış sürele kısıtları kullanılarak yapılan birim yüklenme çalışmaları
- **3. durum:** ÜYK, BM, KPM, yük dengesi, dönme rezervi, en küçük devreye giriş-çıkış süreleri ve rampa limitleri oranı kısıtı kullanılarak yapılan birim yüklenme çalışmaları

Tunçbilek termik santraline ait bilgiler, Çizelge 4.7’de verilmiştir. Birimlerin artımsal yakıt maliyeti (AYM) değerleri, MS excel programı eğri uydurma yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur.

Çizelge 4.7: Tunçbilek termik santraline ait ÜYK, BM, AYM, KPM,  $T_{i,up}$ ,  $T_{i,down}$  değerleri

Birim No	ÜYK (MW)		BM(\$)	AYM	KPM	$T_{i,up}$	$T_{i,down}$
	Min	Maks					
1	8	32	60	33.730	120	1	1
2	17	65	240	28.952	480	2	2
3	35	150	550	27.005	1100	3	3
4	30	150	550	27.659	1100	3	3

Tunçbilek termik santralinde her bir birime ait maliyet fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

$$\text{Birim 1 : } y_1 = 0.515P_1^2 + 10.86P_1 + 149.9$$

$$\text{Birim 2 : } y_2 = 0.227P_2^2 + 8.341P_2 + 284.6$$

$$\text{Birim 3 : } y_3 = 0.082P_3^2 + 9.9441P_3 + 495.8$$

$$\text{Birim 4 : } y_4 = 0.074P_4^2 + 12.44P_4 + 388.9$$

Bu problemin çözümünde yirmidört saatlik zaman dilimi üzer saatlik periyotlarda incelenmiştir. Talep edilen yük değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8: Talep edilen yük değeri (MW)

P	Yük (MW)	P	Yük	P	Yük	P	Yük
1	168	3	260	5	513	7	308
2	150	4	275	6	347	8	231

On birimden oluşan sisteme ait ÜYK, BM, AYM, KPM,  $T_{i,up}$ ,  $T_{i,down}$ ,  $T_{i,cold}$  değerleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9: On birimli sisteme ait ÜYK, BM, AYM, KPM,  $T_{i,up}$ ,  $T_{i,down}$ ,  $T_{i,cold}$  değerleri

Birim No	ÜYK (MW)		BM (Sıcak)	AYM	BM (Soğuk)	$T_{i,up}$	$T_{i,down}$	$T_{i,cold}$
	Min	Maks						
1	150	455	4500	16.48	9000	8	8	5
2	150	455	5000	17.27	10000	5	5	5
3	20	130	550	16.90	1100	5	5	4
4	20	130	560	16.81	1120	5	5	4
5	25	162	900	20.07	1800	6	6	4
6	20	80	170	22.61	340	3	3	2
7	25	85	260	27.78	520	3	3	2
8	10	55	30	26.05	60	1	1	0
9	10	55	30	27.34	60	1	1	0
10	10	55	30	27.84	60	1	1	0

On birimli sistemde her bir birim için maliyet fonksiyonları şu şekildedir:

$$\text{Birim 1 : } y_1 = 0.00048P_1^2 + 16.19P_1 + 1000$$

$$\text{Birim 2 : } y_2 = 0.00031P_2^2 + 17.26P_2 + 970$$

$$\text{Birim 3 : } y_3 = 0.002P_3^2 + 16.60P_3 + 700$$

$$\text{Birim 4 : } y_4 = 0.00211P_4^2 + 16.50P_4 + 680$$

$$\text{Birim 5 : } y_5 = 0.00398P_5^2 + 19.70P_5 + 450$$

$$\text{Birim 6 : } y_6 = 0.00712P_6^2 + 22.26P_6 + 370$$

$$\text{Birim 7 : } y_7 = 0.00079P_7^2 + 27.74P_7 + 480$$

$$\text{Birim 8 : } y_8 = 0.00413P_8^2 + 25.92P_8 + 660$$

$$\text{Birim 9 : } y_9 = 0.0022P_9^2 + 27.27P_9 + 665$$

$$\text{Birim 10 : } y_{10} = 0.00173P_{10}^2 + 27.79P_{10} + 670$$

On birimli sistem için yirmidört saatlik zaman dilimi birer saatlik periyotlarda incelenmiştir. Talep edilen yük değerlerine göre yirmidört periyotta en uygun birim kombinasyonları ve sistemin TM değerleri hesaplanmıştır. Bu sistem için talep edilen yük değerleri Çizelge 4.10’da verilmiştir. On birimli sistem temel alınarak yirmi, kırk, altmış, seksen ve yüz birimli sistemler için de birim yüklenme problemi çözülmüştür. Veriler, on birimli sisteme uygun şekilde yeniden düzenlenmiştir. Örneğin, yirmi birimli sistem için, talep edilen yük değerleri iki ile

çarpılmıştır. Dönme rezervi kısıtı, Tunçbilek termik santrali için talep edilen yük değerinin %5'i, diğer sistemler için %10'u olarak alınmıştır. Rampa yukarı oranı maksimum çıkış gücünün %20'si, rampa aşağı oranı da minimum çıkış gücünün %20'si olarak alınmıştır.

Çizelge 4.10: On birimli sistem için talep edilen yük değeri (MW)

Saat	Yük (MW)	Saat	Yük	Saat	Yük	Saat	Yük
1	700	7	1150	13	1400	19	1200
2	750	8	1200	14	1300	20	1400
3	850	9	1300	15	1200	21	1300
4	950	10	1400	16	1050	22	1100
5	1000	11	1450	17	1000	23	900
6	1100	12	1500	18	1100	24	800

#### 4.2.1 Matematiksel yaklaşımlar ile birim yüklenme problemi uygulamaları

Matematiksel yaklaşımlarla problem çözülürken *GAMS*<sup>®</sup> (Genel cebirsel modelleme sistemi)'de [108] bulunan doğrusal olmayan programlama çözücülerinden CONOPT, CONOPT2, MINOS, MINOS5 ve BARON yazılımları kullanılmıştır.

**Gevşetilmiş Lagrange yöntemi kullanılarak birim yüklenme probleminin çözümü:**

**Tunçbilek termik santrali:** Gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.11: Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları - 1. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 1 1 1



Gevşetilmiş Lagrange ile Tunçbilek termik santralının 1. durum için çözümünde asıl değer: 56251 \$ ve ikil değer: 52812.88 \$ olarak bulunmuştur. İkili boşluk değeri bu problem için % 6.1'dir.

Çizelge 4.12: Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları - 2. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	0 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 1 1 1

Gevşetilmiş Lagrange ile Tunçbilek termik santralının 2. durum için çözümünde asıl değer: 58966.98 \$ ve ikil değer: 56336.10 \$ olarak bulunmuştur. İkili boşluk değeri bu problem için % 4.67'dir.

Çizelge 4.13: Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları - 3. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 0 1 1

Gevşetilmiş Lagrange ile Tunçbilek termik santralının 3. durum için çözümünde asıl değer: 58975 \$ ve ikil değer: 56734 \$ olarak bulunmuştur. İkili boşluk değeri bu problem için 3.95'dir.

**On birimli sistem:** Gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile on birimli sistem için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.14, 4.15 ve 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.14: Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 0 1 1 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
2	750	1 1 1 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
3	850	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 0 1 1 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	22	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	23	900	1 1 1 1 0 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	24	800	1 1 1 0 0 0 0 0 0 0

Gevşetilmiş Lagrange ile on birimli sistemin 1. durum için çözümünde asıl değer: 554986.71 \$ ve ikil değer: 532770.19 \$ olarak bulunmuştur. İkil boşluk değeri bu problem için % 4.17'dir.

Çizelge 4.15: Gevşetilmiş Lagrange yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları(On birim) - 2. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	23	900	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	24	800	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0

Gevşetilmiş Lagrange ile on birimli sistemin 2. durum için çözümünde asıl değer: 565825.64 \$ ve ikil değer: 544429.558 \$ olarak bulunmuştur. İkil boşluk

değeri bu problem için % 3.93 'dür.

Çizelge 4.16: Gevşetilmiş Lagrange yöntemi için uygun birim kombinasyonları(On birim) - 3. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	23	900	1 1 0 0 1 1 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	24	800	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0

Gevşetilmiş Lagrange ile on birimli sistemin 3. durum için çözümünde asıl değer: 565964.32 \$ ve ikil değer: 545455.20 \$ olarak bulunmuştur. İkil boşluk değeri bu problem için % 3.76'dır.

**Ceza fonksiyonları yöntemi kullanılarak birim yüklenme probleminin çözümü:**

**Tunçbilek termik santrali:** Ceza fonksiyonları yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.17, 4.18 ve 4.19'da verilmiştir.

Çizelge 4.17: Ceza fonksiyonları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 1. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	0 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 1 1 1

Ceza fonksiyonları yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 1. durum için çözümünde asıl değer: 56018.1 \$ ve ikil değer: 53132.88 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 5.43'dür.

Çizelge 4.18: Ceza fonksiyonları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 2. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 1 1 1

Ceza fonksiyonları yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 2. durum için çözümünde asıl değer: 58758.97 \$ ve ikil değer: 56228.6 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 4.50'dir.

Çizelge 4.19: Ceza fonksiyonları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 3. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	0 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 0 1 1

Ceza fonksiyonları yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 3. durum için çözümünde, asıl değer: 58872 \$ ve ikil değer: 56646 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 3.93'dür.

**On birimli sistem:** Ceza çarpanları yöntemi ile on birimli sistem için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.20, 4.21 ve 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.20: Ceza fonksiyonları yönteminin uygulanması sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 0 0 1 1 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
2	750	1 0 1 1 1 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
3	850	1 0 1 1 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	22	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	23	900	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	24	800	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0

Ceza fonksiyonları yöntemi ile on birimli sistemin 1. durum için çözümünde, asıl değer: 554368.67 \$ ve ikil değer: 538378.82 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 2.97 'dir.

Çizelge 4.21: Ceza fonksiyonları yönteminin uygulanması sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 2. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	23	900	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	24	800	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0

Ceza fonksiyonları yöntemi ile on birimli sistemin 2. durum için çözümünde, asıl değer: 565215.75 \$ ve ikil değer: 547848.938 \$ olarak bu-

lunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre 3.17'dir.

Çizelge 4.22: Ceza fonksiyonları yönteminin uygulanması sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 3. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 1 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	23	900	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	24	800	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0

Ceza fonksiyonları yöntemi ile on birimli sistemin 3. durum için çözümünde, asıl değer: 565721.64 \$ ve ikil değer: 554140.11 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre 2.09'dur.

**Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi kullanılarak birim yüklenme probleminin çözümü:**

**Tunçbilek termik santrali:** Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.23, 4.24 ve 4.25'te verilmiştir.

Çizelge 4.23: Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 1. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	1 0 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 0 1 1

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 1. durum için çözümünde, asıl değer: 55989 \$ ve ikil değer: 53670.44 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 4.32'dir.

Çizelge 4.24: Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 2. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	0 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 0 1 1

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 2. durum için çözümünde, asıl değer: 58657.5 \$ ve ikil değer: 56570.06 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 3.69'dur.

Çizelge 4.25: Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları - 3. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 0 1 1

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 3. durum için çözümünde, asıl değer: 58705 \$ ve ikil değer: 57172.7 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 2.68'dir.

**On birimli sistem:** Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.26, 4.27 ve 4.28'de verilmiştir.

Çizelge 4.26: Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
2	750	1 1 1 1 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
3	850	1 1 1 0 0 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	22	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	23	900	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	24	800	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile on birimli sistemin 1. durum için çözümünde, asıl değer: 553965.35 \$ ve ikil değer: 538824.39 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 2.81'dir.

Çizelge 4.27: Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 2. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0
2	750	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	23	900	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	24	800	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile on birimli sistemin 2. durum için çözümünde asıl değer: 564927.85 \$ ve ikil değer: 550719.29 \$ olarak



bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 2.58'dir.

Çizelge 4.28: Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi sonucunda bulunan uygun birim kombinasyonları (On birim) - 3. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	23	900	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	24	800	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile on birimli sistemin 3. durum için çözümünde, asıl değer: 565392.54 \$ ve ikil değer: 557421.42 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 1.87'dir.

### MSG yöntemi kullanılarak birim yüklenme probleminin çözümü:

**Tunçbilek termik santrali - 1. durum:** MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.29, 4.30 ve 4.31'de verilmiştir [109].

Çizelge 4.29: MSG yöntemiyle bulunan uygun birim kombinasyonları - 1. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	0 1 1 1
8	231	0 1 1 1

MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 1. durum için çözümünde, asıl değer: 55905 \$ ve ikil değer: 55905 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre 0'dır.

Çizelge 4.30: MSG yöntemiyle bulunan uygun birim kombinasyonları - 2. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 0 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	0 1 1 1
8	231	0 0 1 1

MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 2. durum için çözümünde, asıl değer: 58610 \$ ve ikil değer: 58610 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre 0'dır.

Çizelge 4.31: MSG yöntemiyle bulunan uygun birim kombinasyonları - 3. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 0 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	0 1 1 1
8	231	0 1 1 1

MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 3. durum için çözümünde, asıl değer: 58646.6 \$ ve ikil değer: 58646.6 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 0'dır.

**On birimli sistem:** MSG yöntemi ile on birimli için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.32, 4.33 ve 4.34'te verilmiştir.

Çizelge 4.32: MSG yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
2	750	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 1 1 0 1 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	22	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	23	900	1 1 1 1 0 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	24	800	1 1 1 0 0 0 0 0 0 0

MSG yöntemi ile on birimli sistemin 1. durum için çözümünde, asıl değer: 553847.9 \$ ve ikil değer: 553847.9 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre 0'dır.

Çizelge 4.33: MSG yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 2. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
2	750	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	23	900	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	24	800	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0

MSG yöntemi ile on birimli sistemin 2. durum için çözümünde, asıl değer: 564851.97 \$ ve ikil değer: 564851.97 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri

bu sonuçlara göre 0'dır.

Çizelge 4.34: MSG yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 3. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
2	750	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	23	900	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	24	800	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0

MSG yöntemi ile on birimli sistemin 3. durum için çözümünde, asıl değer: 565165.89 \$ ve ikil değer: 565165.89 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 0'dır.

**Uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient (F-MSG) algoritması kullanılarak birim yüklenme probleminin çözümü:**

**Tunçbilek termik santrali:** F-MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.35, 4.36 ve 4.37'de verilmiştir.

Çizelge 4.35: F-MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için uygun birim kombinasyonu - 1. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	0 1 1 1
8	231	0 1 1 1

F-MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 1. durum için çözümünde, asıl değer: 55978 \$ ve ikil değer: 53679 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 4.30'dur.

Çizelge 4.36: F-MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için uygun birim kombinasyonu - 2. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 0 1 1

F-MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 2. durum için çözümünde, asıl değer: 58632 \$ ve ikil değer: 56420 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 3.92'dir.

Çizelge 4.37: F-MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için uygun birim kombinasyonu - 3. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 0 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	0 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 1 1 1
8	231	0 1 1 1

F-MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santralının 3. durum için çözümünde, asıl değer: 58733 \$ ve ikil değer: 57327 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 2.45'dir.

**On birimli sistem:** F-MSG yöntemi ile Tunçbilek termik santrali için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.38, 4.39 ve 4.40'da verilmiştir.

Çizelge 4.38: F-MSG'nin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 1. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
2	750	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 1 1 0 1 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	22	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	23	900	1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	24	800	1 1 1 0 0 0 0 0 0 0

F-MSG yöntemi ile on birimli sistemin 1. durum için çözümünde, asıl değer: 553865 \$ ve ikil değer: 540880 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 2.40'dır.

Çizelge 4.39: F-MSG'nin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 2. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	23	900	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	24	800	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0

F-MSG yöntemi ile on birimli sistemin 2. durum için çözümünde, asıl değer: 564918.6 \$ ve ikil değer: 551950 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 2.35'dir.

Çizelge 4.40: F-MSG'nin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları (On birim) - 3. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	23	900	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	24	800	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0

F-MSG yöntemi ile on birimli sistemin 3. durum için çözümünde, asıl değer: 565286.7 \$ ve ikil değer: 553280 \$ olarak bulunmuştur. Bağlı ikil boşluk değeri bu sonuçlara göre % 2.17'dir.

Yirmi, kırk, altmış, seksen ve yüz birimden oluşan sistemler de matematiksel yöntemler kullanılarak benzer şekilde üç durum için de çözülmüştür. Bu sistemler için bulunan asıl, ikil değer ve bağlı ikil boşluk değerleri sırasıyla Çizelge 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45'te verilmiştir.

Çizelge 4.41: Yirmi birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar

Durum	Karşılaştırılan Değerler	Gev. Lagrange	Ceza fonk.	Gen. Lag. ceza fonk.	MSG	F-MSG
1	Asıl maliyet	1108982	1106970	1106302	1104134	1103659
	İkil maliyet	1067457	1067576	1073246	1104134	1082230
	Bağlı ikil boşluk	3.89	3.69	3.08	0	1.98
2	Asıl maliyet	1130661	1128971	1128302	1126134	1126559
	İkil maliyet	1091160	1089635	1094801	1126134	1098105
	Bağlı ikil boşluk	3.62	3.61	3.06	0	2.59
3	Asıl maliyet	1130938	1129247	1128579	1126400	1126943
	İkil maliyet	1088382	1087068	1087682	1126400	1087972
	Bağlı ikil boşluk	3.91	3.88	3.76	0	3.49

Çizelge 4.42: Kırk birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar

Durum	Karşılaştırılan Değerler	Gev. Lagrange	Ceza fonk.	Gen. Lag. ceza fonk.	MSG	F-MSG
1	Asıl maliyet	2214965	2214544	2209101	2206541	2208812
	İkil maliyet	2039700	2140276	2144966	2206541	2165712
	Bağlı ikil boşluk	3.69	3.47	2.99	0	1.99
2	Asıl maliyet	2258540	2257961	2253101	2249008	2250541
	İkil maliyet	2174391	2180340	2188114	2249008	2185415
	Bağlı ikil boşluk	3.87	3.56	2.97	0	2.98
3	Asıl maliyet	2260453	2257754	2253159	2249850	2250187
	İkil maliyet	2176023	2175100	2174444	2249850	2174934
	Bağlı ikil boşluk	3.88	3.80	3.62	0	3.46

Çizelge 4.43: Altmış birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar

Durum	Karşılaştırılan Değerler	Gev. Lagrange	Ceza fonk.	Gen. Lag. ceza fonk.	MSG	F-MSG
1	Asıl maliyet	3387557	3386101	3385047	3384998	3385017
	İkil maliyet	3274267	3277612	3290926	3384998	3315393
	Bağlı ikil boşluk	3.46	3.31	2.86	0	2.10
2	Asıl maliyet	3394107	3383805	3383027	3371106	3371234
	İkil maliyet	3270231	3270640	3283854	3371106	3282603
	Bağlı ikil boşluk	3.51	3.46	3.02	0	2.70
3	Asıl maliyet	3401121	3390876	3389901	3379805	3379982
	İkil maliyet	3282618	3268944	3268004	3379805	3269790
	Bağlı ikil boşluk	3.61	3.73	3.53	0	3.37



Çizelge 4.44: Seksen birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar

Durum	Karşılaştırılan Değerler	Gev. Lagrange	Ceza fonk.	Gen. Lag. ceza fonk.	MSG	F-MSG
1	Asıl maliyet	4517249	4516876	4515722	4515708	4515782
	İkil maliyet	4365335	4371311	4385047	4515708	4375757
	Bağlı ikil boşluk	3.48	3.33	2.98	0	3.20
2	Asıl maliyet	4526049	4515752	4509062	4494477	4494876
	İkil maliyet	4366665	4366420	4376455	4494477	4368198
	Bağlı ikil boşluk	3.65	3.42	3.03	0	2.90
3	Asıl maliyet	4532105	4519003	4519086	4495567	4495434
	İkil maliyet	4371243	4364499	4363736	4495567	4346774
	Bağlı ikil boşluk	3.68	3.54	3.56	0	3.42

Çizelge 4.45: Yüz birimden oluşan sistem için farklı durumlarda bulunan sonuçlar

Durum	Karşılaştırılan Değerler	Gev. Lagrange	Ceza fonk.	Gen. Lag. ceza fonk.	MSG	F-MSG
1	Asıl maliyet	5547287	5539083	5527287	5518435	5519567
	İkil maliyet	5360215	5359019	5364214	5518435	5327767
	Bağlı ikil boşluk	3.49	3.36	3.04	0	3.60
2	Asıl maliyet	5657278	5639278	5620278	5518435	5615676
	İkil maliyet	5460166	5451211	5450759	5518435	5446800
	Bağlı ikil boşluk	3.61	3.45	3.11	0	3.10
3	Asıl maliyet	5659278	5641278	5620854	5616653	5618514
	İkil maliyet	5454200	5443147	5435503	5616653	5439026
	Bağlı ikil boşluk	3.76	3.64	3.41	0	3.30

#### 4.2.2 Akıllı sezgisel yaklaşımlar ile birim yüklenme problemi uygulamaları

**Bulanık mantık yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözümü (Tunçbilek termik santrali - 1. durum):** Bu kısımda, birim yüklenme problemi, ilk durum dikkate alınarak bulanık mantık yöntemi ile çözülmüştür. ÜYK, AYM ve BM değerleri, farklı değerler arasında değiştiğinden, bulanık kümeler ile tanımlanmıştır. Değişkenler tanımlandıktan sonra, bulanık kümeler 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir. Bulanık mantık yöntemi ile problemin çözümü için MATLAB®'de bulanık mantık araç kutusu kullanılmıştır.

ÜYK: {Düşük (D), Ortalamanın Altı (OA), Ortalama (O), Ortalamanın Üstü (OÜ), Yüksek (Y)}

BM = {Düşük (D), Orta(OR), Yüksek (Y)}

AYM = {Sıfır (S), Küçük (K), Büyük (B)}

Sistemin maliyeti, amaç fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

TM = {Düşük (D), Ortalamanın Altı (OA), Ortalama (O), Ortalamanın Üstü (OÜ), Yüksek (Y)}

Bulanık kümeler tanımlandıktan sonra, If-then kuralları oluşturulur. Birimlerin ÜYK, AYM ve BM değerleri giriş değişkeni olarak ele alınmış, maliyet değeri ise çıkış değişkeni olarak belirlenmiştir. Giriş ve çıkış arasındaki ilişki şu şekildedir:

TM = ÜYK ve BM ve AYM

Bu ifade bulanık kümelerde şu şekilde gösterilebilir:

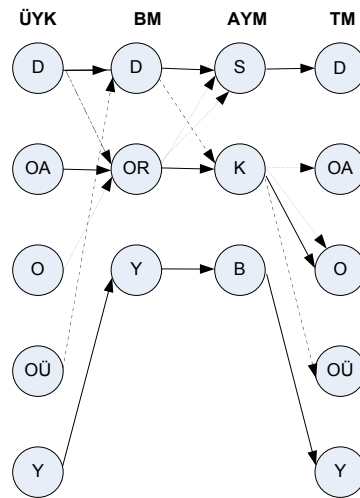
TM = ÜYK  $\cap$  BM  $\cap$  AYM

Maliyet değerinin üyelik fonksiyonu  $\mu_{TM}$  aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$\mu_{TM} = \mu_{\ddot{U}YK} \cap \mu_{BM} \cap \mu_{AYM}$

$\mu_{TM} = \min \mu_{\ddot{U}YK}, \mu_{BM}, \mu_{AYM}$

$\mu_{\ddot{U}YK}$ ,  $\mu_{BM}$ , ve  $\mu_{AYM}$  değerleri sırasıyla ÜYK, AYM ve BM değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarıdır. Bulanık kural çizelgesi, giriş ve çıkış değişkenlerine bağlı olarak oluşturulur. Bu çalışmada toplam kural sayısı 45'tir. Bazı kurallar arasındaki ilişki Şekil 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.40: Bazı kurallar arasındaki ilişkinin gösterimi

Kurallar aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

Eğer ÜYK (.) ve BM (.) ve AYM (.) ise TM (.)'dir.

Bu kurallardan bazıları şu şekildedir: Kural 1: Eğer ÜYK D, BM D, AYM S ise TM D'dir.

Kural 2: Eğer ÜYK OA, BM OR, AYM K ise TM OA'dır.

Kural 3: Eğer ÜYK O, BM OR, AYM K, ise TM O'dır.

Kural 4: Eğer ÜYK OÜ, BM OR, AYM K, ise TM OÜ'dir.

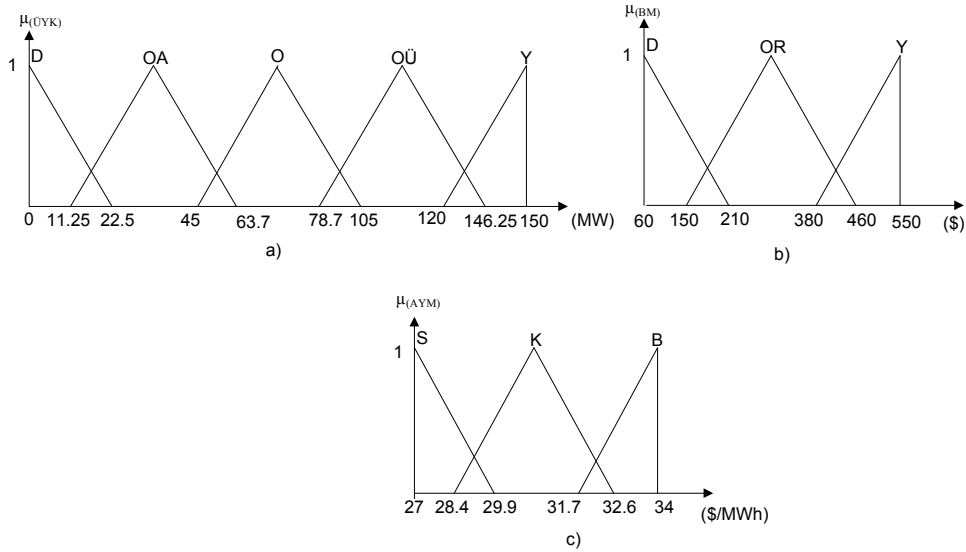
Kural 5: Eğer ÜYK Y, BM Y, AYM B, ise TM Y'dir.

Arındırma yöntemi ile kesin değerler belirlenir. Arındırma yöntemlerinden biri olan centroid yöntemi ile üretim maliyeti değeri belirlenir.

$$TM = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(TM)_i \times TM_i}{\sum_{i=1}^n \mu(TM)_i} \quad (4.19)$$

$\mu TM_i$ , üyelik fonksiyonu değeridir.

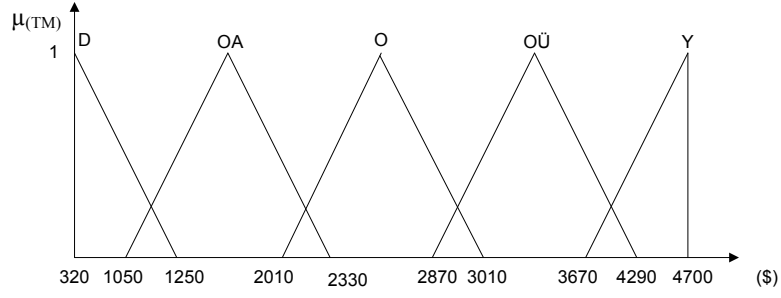
ÜYK, AYM ve BM'ye ait üyelik fonksiyonları Şekil 4.41'de verilmiştir.



Şekil 4.41: a) ÜYK b) BM c) AYM'nin üyelik fonksiyonları

Örneğin, en düşük BM '60\$' ve '210\$', en yüksek BM, '380\$-550\$', benzer AYM değeri de, ortalama BM '150\$-460\$' olarak seçilmiştir. Diğer değişkenlerde benzer şekilde dilsel olarak tanımlanmıştır. Maliyete ait üyelik fonksiyonu değeri de Şekil 4.42'de gösterilmiştir. TM'nin üyelik fonksiyonu şu şekilde tanımlanmıştır: Düşük maliyet değeri '320\$-1250\$' olarak belirlenmiştir. Yüksek maliyet değeri, '3670\$-4700\$' olarak seçilmiştir. Benzer ifadeler diğer alt üyelik

fonksiyonları için de belirlenir.



Şekil 4.42: Maliyetin üyelik fonksiyonu

Burada Mamdani min-maks kuralı, ara mekanizma olarak kullanılmıştır. 260 MW yük durumu için bütün birimler devrede olduğunda, bulanık mantık yöntemindeki kombinasyonlardan biri için birim yüklenme sonucu Çizelge 4.46'da verilmiştir.

Çizelge 4.46: Maliyet değerlerinin bazı sonuçları

Birim No	Yük (MW)	TM (\$)
1	11.60	1210
2	23.80	1540
3	117.8	3130
4	106.8	2880

Bulanık mantık yönteminin sonucunda bulunan maliyet değerleri Çizelge 4.47'de verilmiştir.

Çizelge 4.47: Bulanık mantık yöntemi ile bulunan en uygun birim kombinasyonları

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu	Bulanık mantık	
			UM(\$)	TM(\$)
1	168	0 0 1 1	4840	<b>4840</b>
2	150	0 0 1 0	3530	<b>8370</b>
3	260	0 0 1 1	6860	<b>15230</b>
4	275	0 0 1 1	7060	<b>22290</b>
5	313	0 1 1 1	9480	<b>31770</b>
6	347	0 1 1 1	9540	<b>41310</b>
7	305	0 1 1 1	9360	<b>50670</b>
8	231	0 0 1 1	6740	<b>57410</b>

Çizelge 4.47'de 1. periyottaki minimum üretim maliyeti değeri, ikinci periyottaki üretim maliyeti değerine eklenerek ve diğer periyotlar için aynı hesaplamalar yapılarak maliyet hesaplanmıştır. Çizelge 4.47'den görüldüğü gibi, TM değeri, bulanık mantık yönteminde 57410\$ olarak bulunmuştur.

**Benzetimli tavlama yöntemi ile birim yüklenme probleminin çözümü:** Birim yüklenme problemine benzetimli tavlama yöntemini uygulamak için ekonomik dağıtım yönteminin uygulanması gerektiğinden, ekonomik dağıtım yöntemlerinden olan ikinci derece gradient ve lamda-öteleme yöntemleri ayrı ayrı uygulanarak benzetimli tavlama yöntemi ile elde edilen bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır [107]. Bu yöntemle problem çözülürken, başlangıç sıcaklık değeri 2000 ve olasılık limit değeri ise 0.6 olarak alınmıştır. Bu yöntemle problemin çözümü için MATLAB®’de geliştirilen yazılımlar kullanılmıştır.

**Tunçbilek termik santrali:** Benzetimli tavlama yöntemi için ekonomik dağıtım yöntemi olarak, 1. durum için ikinci derece gradient yönteminin uygulanması sonucunda bulunan birim kombinasyonları Çizelge 4.48’de, lamda-öteleme sonucunda bulunan birim kombinasyonları Çizelge 4.49’da verilmiştir.

Çizelge 4.48: Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda bulunan her periyottaki birim kombinasyonları (İkinci derece gradient) - 1. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	1 0 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 0 1 1
8	231	0 0 1 1

Çizelge 4.49: Benzetimli tavlama yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları ve TM (Lamda-öteleme) - 1. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	1 1 1 1
4	275	1 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 0 1 1
8	231	0 0 1 1

Tunçbilek termik santralinde 1. durumda ekonomik dağıtım yöntemi olarak ikinci derece gradient kullanıldığında TM 57325 \$, lamda-öteleme yöntemi kullanıldığında 56019 \$ bulunmuştur.

Lamda-öteleme ile daha düşük maliyet değeri bulunduğundan, bu kısımdan sonra benzetimli tavlama yöntemi için ekonomik dağıtım yöntemi olarak lamda-öteleme kullanılmıştır. Tunçbilek termik santralinde 2. ve 3. durum için bulunan uygun birim kombinasyonları, Çizelge 4.50 ve 4.51’de verilmiştir.

Çizelge 4.50: Benzetimli tavlama yönteminde her periyotta uygun birim kombinasyonları - 2. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	0 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	0 1 1 1
8	231	0 1 1 1

Çizelge 4.51: Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda bulunan her periyottaki birim kombinasyonları - 3. durum

Periyot	Yük(MW)	Birim kombinasyonu
1	168	0 0 1 1
2	150	0 0 1 1
3	260	0 1 1 1
4	275	1 1 1 1
5	313	1 1 1 1
6	347	1 1 1 1
7	305	1 0 1 1
8	231	0 0 1 1

Tunçbilek termik santralinin 2. durum için çözümü sonucunda TM 58761 \$, 3. durum için çözümü sonucunda TM 58876 \$ olarak bulunmuştur.

**On birimli sistem:** Benzetimli tavlama ile on birimli sistem için her periyotta bulunan uygun birim kombinasyonları sırasıyla, Çizelge 4.52, 4.53 ve 4.54'te verilmiştir.

Çizelge 4.52: Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları - 1. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 0 0 1 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0
2	750	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
3	850	1 0 1 1 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 0 1 1 1 1 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 1	20	1400	1 1 1 1 1 0 0 0 0 1
9	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 1	21	1300	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 0	22	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	23	900	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	24	800	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0

Çizelge 4.53: Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları - 2. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 0 0 0 1
9	1300	1 1 1 1 1 1 0 0 0 1	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	23	900	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	24	800	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0

Çizelge 4.54: Benzetimli tavlama yönteminin uygulanması sonucunda her periyotta uygun birim kombinasyonları - 3. durum

Saat	Yük	Birim kombinasyonu	Saat	Yük	Birim kombinasyonu
1	700	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	13	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
2	750	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	14	1300	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
3	850	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	15	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
4	950	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	16	1050	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
5	1000	1 1 0 1 1 0 0 0 0 0	17	1000	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
6	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	18	1100	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
7	1150	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	19	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
8	1200	1 1 1 1 1 0 0 0 0 0	20	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1
9	1300	1 1 1 1 1 1 1 0 0 0	21	1300	1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
10	1400	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	22	1100	1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0
11	1450	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1	23	900	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0
12	1500	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	24	800	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0

On birimli sistemin 1. durum için çözümü sonucunda TM 554768.6 \$, 2. durum için çözümü sonucunda TM 565221.4 \$ ve 3. durum için çözümü sonucunda TM 565746 \$ olarak bulunmuştur.

#### 4.2.3 Birim yüklenme probleminin çözümünde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

Birim yüklenme probleminin çözümünde kullanılan tüm yöntemler maliyet değerleri açısından, matematiksel yöntemler ise asıl, ikil maliyet ve bağıl ikil boşluk değerleri açısından karşılaştırılmıştır [110–111].

Dört birimden oluşan Tunçbilek termik santrali ve on birimli sistem için üç durumda da bulunan maliyet değerleri tablolar halinde sırasıyla Çizelge 4.55 ve 4.56'da verilmiştir.

Yirmi, kırk, altmış, seksen ve yüz birimli sistemler için matematiksel yöntemlerle bulunan çözüm sonuçları 4.2.1 bölümünde, Çizelge 4.41-4.45'te sunulmuştur. Bu kısımda, özellikle dört ve on birimli sistemlerin karşılaştırmaları üzerinde durulmuştur.



Çizelge 4.55: Tunçbilek termik santralinde tüm yöntemler için maliyet değerleri

Yöntem	1. durum	2. durum	3. durum
Gevşetilmiş Lagrange	56251.00	58966.98	58975.00
Ceza fonk.	56018.10	58758.97	58872.00
Gen. Lagrange ceza fonk.	55989.00	58657.50	58705.00
MSG	55905.00	58610.00	58646.60
F-MSG	55978.00	58632.00	58733.00
Bulanık mantık	57410.00	-	-
Benzetimli tavlama	56019.00	58761.00	58876.00

Çizelge 4.55'ten görüldüğü gibi, Tunçbilek termik santrali için 1. durum ele alındığında, bulanık mantık yönteminin en yüksek maliyet değerini bulduğu görülmektedir.

Çizelge 4.56: On birimli sistemde tüm yöntemler için maliyet değerleri

Yöntem	1. durum	2. durum	3. durum
Gev. Lagrange	554986.71	565825.64	565964.32
Ceza fonk.	554368.67	565215.75	565721.64
Gen. Lagrange ceza fonk.	553965.35	564927.85	565392.54
MSG	553847.90	564851.97	565165.89
F-MSG	553865.00	564918.60	565286.70
Benzetimli tavlama	554768.60	565221.40	565746.00

Çizelge 4.55 ve 4.56'dan görüldüğü gibi, Tunçbilek termik santrali ve on birimli sistemde üç durum için, matematiksel yöntemler arasında, en düşük maliyet değeri MSG yöntemi, en yüksek maliyet değeri ise gevşetilmiş Lagrange yöntemi ile bulunmuştur. Benzetimli tavlama yöntemi, bulanık mantık yönteminden daha düşük maliyet değerine ulaşmasına rağmen, matematiksel yöntemlerden gevşetilmiş Lagrange yöntemi hariç, diğer yöntemlere göre daha yüksek maliyet değerleri bulmuştur.

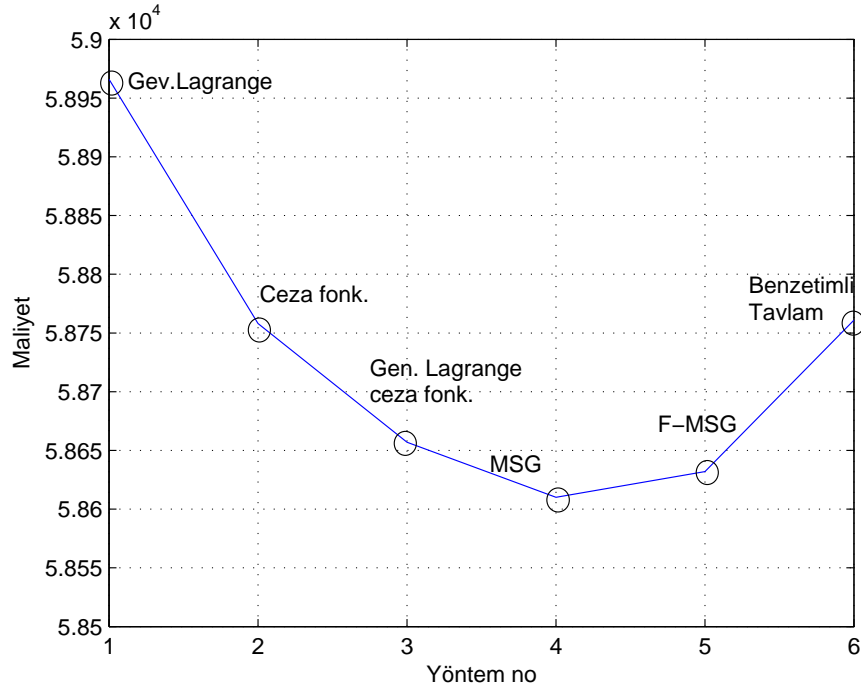
Gevşetilmiş Lagrange yöntemiyle on birimli sistem için literatürdeki çalışmalarda bulunan maliyet değeri bulunmuş ve literatürde bu problemin çözümü için daha önce kullanılmayan üç yöntem için de Gevşetilmiş Lagrange yöntemine göre daha düşük maliyet değerleri elde edilmiştir.

Örneğin, Tunçbilek termik santralinde 1. durum için, gevşetilmiş Lagrange ile bulunan TM değerinin MSG yönteminden, 296 \$, 2. durum için, 356 \$, 3. durum için 329 \$ daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu değer bir yıl için 1. durumda TM değerinin 108040 \$, 2. durumda 129940 \$, 3. durumda 120085 \$ fazla olacağını göstermektedir.

Benzer şekilde, on birimli sistem için 1. durum ele alındığında, gevşetilmiş Lagrange ile bulunan TM değerinin MSG yönteminden, 1138.81 \$, 2. durum için, 973.67 \$, 3. durum için 798.43 \$ daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu değer bir yıl için 1. durumda TM değerinin 415665.65 \$, 2. durumda 355389.55 \$ ve 3. durumda ise 291426.95 \$ fazla olacağını göstermektedir.

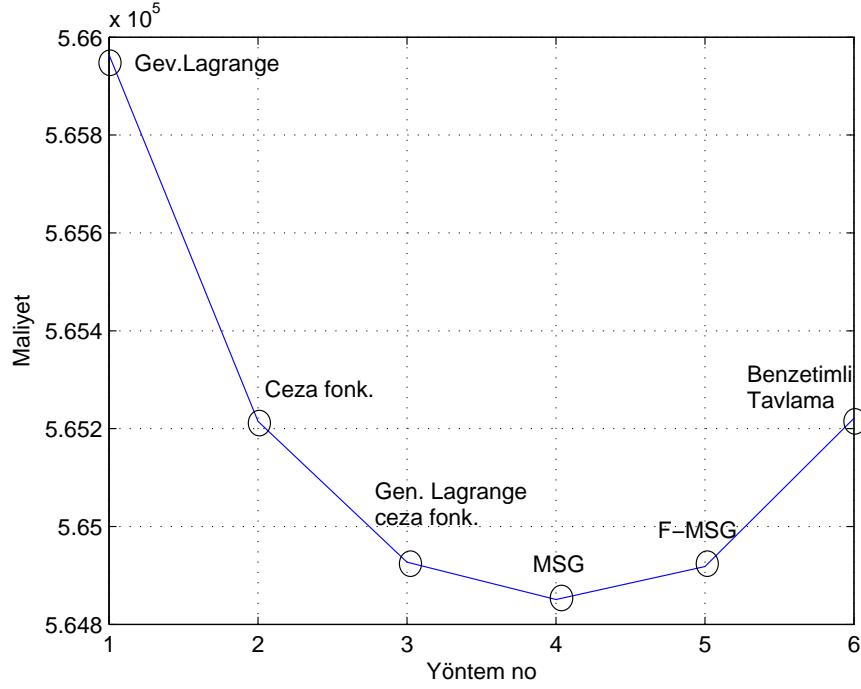
Sonuçlardan görüldüğü gibi, aynı sistem için farklı yöntemlerle bulunan maliyet değerleri önemli oranda değişiklik göstermektedir. Bu maliyet değerlerinin bir yılda ne kadar farklılık gösterdiği ise yukarıda verilen değerlerden açıkça görülmektedir.

Dört birimli sistemde ikinci durumda kullanılan yöntemler için bulunan maliyet değerleri Şekil 4.43'te gösterilmiştir.



Şekil 4.43: Dört birimli sistem için bulunan maliyet değerleri

On birimli sistemde ikinci durumda kullanılan yöntemler için bulunan maliyet değerleri Şekil 4.44'te gösterilmiştir.



Şekil 4.44: On birimli sistem için bulunan maliyet değerleri

Matematiksel yöntemlerle, dört birimden oluşan Tunçbilek termik santrali ve on birimli sistem için üç durumda da bulunan asıl, ikil maliyet ve bağıl ikil boşluk değerleri tablolar halinde sırasıyla Çizelge 4.57 ve 4.58'de verilmiştir.

Çizelge 4.57: Tunçbilek termik santrali için matematiksel yöntemlerle farklı durumlarda bulunan sonuçlar

Durum	Karşılaştırılan Değerler	Gev. Lagrange	Ceza fonk.	Gen. Lag. ceza fonk.	MSG	F-MSG
1	Asıl maliyet	56251.00	56018.10	55989.00	55905.00	55978.00
	İkil maliyet	52812.88	53132.88	53670.44	55905.00	53679.00
	Bağıl ikil boşluk	6.1	5.43	4.32	0	4.3
2	Asıl maliyet	58966.98	58758.97	58657.50	58610.00	58632.00
	İkil maliyet	56336.10	56228.60	56570.06	58610.00	56420.00
	Bağıl ikil boşluk	4.67	4.50	3.69	0	3.92
3	Asıl maliyet	58975.00	58872.00	58705.00	58646.60	58733.00
	İkil maliyet	56734.00	56646.00	57127.70	58646.60	57327.00
	Bağıl ikil boşluk	3.95	3.93	2.68	0	2.45

Çizelge 4.58: On birimli sistem için matematiksel yöntemlerle farklı durumlarda bulunan sonuçlar

Durum	Karşılaştırılan Değerler	Gev. Lagrange	Ceza fonk.	Gen. Lag. ceza fonk.	MSG	F-MSG
1	Asıl maliyet	554986.71	554368.67	553965.35	553847.90	553865.00
	İkil maliyet	532770.19	538378.82	538824.39	553847.90	540880.00
	Bağlı ikil boşluk	4.17	2.97	2.81	0	2.4
2	Asıl maliyet	565825.64	565215.75	564927.85	564851.97	564918.60
	İkil maliyet	544429.55	547848.93	550719.29	564851.97	551950.00
	Bağlı ikil boşluk	3.93	3.17	2.58	0	2.35
3	Asıl maliyet	565964.32	565721.64	565392.54	565165.89	565286.70
	İkil maliyet	545455.20	554140.11	557421.42	565165.89	553280.00
	Bağlı ikil boşluk	3.76	2.09	1.87	0	2.17

Çizelge 4.57 ve 4.58'den görüldüğü gibi, MSG yöntemiyle problemin çözümünde bağlı ikil boşluk değeri sıfır elde edilmiştir. Diğer yöntemlerde, dört birimli sistemler için bulunan bağlı ikil boşluk değerleri, on birimli sisteme göre daha yüksektir. Matematiksel yöntemlerle problemin çözümünde, bağlı ikil boşluk değeri azaldıkça çözümün kalitesi artmaktadır. Burada MSG yöntemi ile asıl ve ikil maliyet değerleri arasında ortaya çıkan bağlı ikil boşluk değeri sıfır bulunarak optimum çözüme ulaşılmıştır.

### 4.3 Birim Yüklenme Probleminin Yük Tahmini Analizi Kullanılarak Optimum Çözümlemesi

Yük tahmininin doğru bir şekilde yapılması, birim yüklenme probleminin çözümünün geliştirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu kısımda, Tunçbilek termik santrali model olarak ele alınmıştır.

Öncelikle, 2002-2005 yıllarına ait saatlik gerçek yük değerleri kullanılarak, 2006 yılı yük değerleri matematiksel model ve YSA yaklaşımları kullanılarak saatlik olarak tahmin edilmiştir (2002-2005 yıllarına ait verileri kullanılarak, 2006 yılına ait yük değerleri matematiksel model ile bulunduğu MAPE= % 7.22, RMSE= % 1747.6, YSA ile bulunduğu ise MAPE= % 4.17, RMSE= % 1133.7'dir).

Yük tahmini analizinden elde edilen sonuçlar kullanılarak sekiz periyot boyunca birim yüklenme problemi ikinci durum için benzetimli tavlama, genişletilmiş Lagrange ceza fonksiyonları, MSG ve F-MSG yöntemleri kullanılarak yeniden çözülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tunçbilek termik santralının toplam kurulu güç değeri 397 MW'dır. Türkiye'deki 2006 yılına ait toplam kurulu güç değeri 40564.8 MW'dır. Bu durumda, Tunçbilek termik santrali Türkiye'nin elektrik enerjisi talebinin %0.97'sini karşılamaktadır. Bu santral için, 2006 yılına ait gerçek yük değerleri kullanılırken bu oran dikkate alınmıştır [112].

2006 yılına ait herhangi bir gün (30 Eylül 2006) için sekiz periyot boyunca matematiksel yöntem ile tahmin edilen yük değerleri Çizelge 4.59'da verilmiştir.

Çizelge 4.59: Matematiksel model ile tahmin edilen yük değerleri

Periyot	Yük	Periyot	Yük
1	159.0000	5	194.9698
2	194.8247	6	202.6392
3	201.8041	7	182.6701
4	197.7732	8	163.8351

30 Eylül 2006 tarihi için sekiz periyot boyunca YSA ile tahmin edilen yük değerleri Çizelge 4.60'da verilmiştir.

Çizelge 4.60: YSA ile tahmin edilen yük değerleri

Periyot	Yük	Periyot	Yük
1	156.8866	5	189.4948
2	160.7216	6	195.7938
3	186.5258	7	184.9485
4	186.1237	8	162.0412

30 Eylül 2006 tarihi için sekiz periyot boyunca gerçek yük değerleri Çizelge 4.61'de verilmiştir.

Çizelge 4.59, 4.60 ve 4.61'de bulunan değerler kullanılarak birim yüklenme problemi yeniden çözülmüştür.

Çizelge 4.61: Gerçek yük değerleri

Periyot	Yük	Periyot	Yük
1	149.9071	5	193.1561
2	184.1254	6	194.0679
3	197.8703	7	173.9695
4	195.6684	8	162.9600

Benzetimli tavlama yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri Çizelge 4.62’de verilmiştir.

Çizelge 4.62: Tunçbilek termik santralinde benzetimli tavlama yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri

Periyot	Birim kombinasyonları (Matematiksel yöntem)	Birim kombinasyonları (YSA)	Birim kombinasyonları (Gerçek yük değerleri)
1	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 0
2	0 0 1 1	0 0 1 1	0 1 1 0
3	0 0 1 1	0 0 1 1	0 1 1 0
4	0 0 1 1	0 0 1 1	1 1 1 0
5	0 0 1 1	0 0 1 1	0 1 1 0
6	0 0 1 1	0 0 1 1	0 1 1 0
7	1 0 1 1	0 0 1 1	0 1 1 0
8	0 0 1 1	0 0 1 1	1 1 1 0
TM	42573 \$	41292 \$	41894 \$

Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri Çizelge 4.63’te verilmiştir.

Çizelge 4.63: Tunçbilek termik santralinde genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri

Periyot	Birim kombinasyonları (Matematiksel yöntem)	Birim kombinasyonları (YSA)	Birim kombinasyonları (Gerçek yük değerleri)
1	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 0
2	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
3	0 1 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
4	0 1 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
5	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
6	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
7	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
8	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
TM	42547 \$	41254 \$	41867 \$

MSG yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri Çizelge 4.64'te verilmiştir.

Çizelge 4.64: Tunçbilek termik santralinde MSG yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri

Periyot	Birim kombinasyonları (Matematiksel yöntem)	Birim kombinasyonları (YSA)	Birim kombinasyonları (Gerçek yük değerleri)
1	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 0
2	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
3	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
4	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
5	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
6	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
7	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
8	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
TM	42472 \$	41233 \$	41819 \$

F-MSG yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri Çizelge 4.65'te verilmiştir.

Çizelge 4.65: Tunçbilek termik santralinde F-MSG yöntemi ile gerçek yük değerleri ve tahmin edilen yük değerleri için bulunan birim kombinasyonları ve TM değerleri

Periyot	Birim kombinasyonları (Matematiksel yöntem)	Birim kombinasyonları (YSA)	Birim kombinasyonları (Gerçek yük değerleri)
1	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 0
2	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
3	0 1 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
4	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
5	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
6	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
7	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
8	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1
TM	42534 \$	41266 \$	41867 \$

Çizelge 4.62-4.65'ten, farklı birim yüklenme yöntemleri, farklı yük değerleri ve yük tahmini analizleri için toplam maliyet değerinin değişiklik gösterdiği görülmektedir. Sezgisel yöntemlerden olan benzetimli tavlama ile farklı yük tahmini analizleri için en yüksek maliyet değeri bulunmuştur. Matematiksel yöntemlerden olan MSG ile farklı yük tahmini analizleri için en düşük maliyet değeri elde edilmiştir.

Çizelge 4.62'de, matematiksel yöntem ile yük tahmini analizi yapıldığında, gerçek yük değerlerine göre maliyet değeri 679 \$ daha fazla, YSA ile yük tahmini analizi yapıldığında, gerçek yük değerlerine göre maliyet değeri 602 \$ daha düşük çıkmıştır.

Çizelge 4.63'te, matematiksel yöntem ile yük tahmini analizi yapıldığında, gerçek yük değerlerine göre maliyet değeri 680 \$ daha fazla, YSA ile yük tahmini analizi yapıldığında, gerçek yük değerlerine göre maliyet değeri 613 \$ daha düşük çıkmıştır.

Çizelge 4.64'te, matematiksel yöntem ile yük tahmini analizi yapıldığında, gerçek yük değerlerine göre maliyet değeri 653 \$ daha fazla, YSA ile yük tahmini analizi yapıldığında, gerçek yük değerlerine göre maliyet değeri 586 \$ daha düşük çıkmıştır.



Çizelge 4.65'te, matematiksel yöntem ile yük tahmini analizi yapıldığında, gerçek yük değerlerine göre maliyet değeri 667 \$ daha fazla, YSA ile yük tahmini analizi yapıldığında, gerçek yük değerlerine göre maliyet değeri 601 \$ daha düşük çıkmıştır.

Sonuçlardan görülmektedir ki, 30 Eylül 2006 tarihi için yapılan analizlerde YSA ile bulunan ortalama yük değerleri, gerçek yük değerlerinden daha düşüktür. Önerilen matematiksel yöntemin bulduğu yük değerleri ise, gerçek yük değerlerine göre ortalama biraz daha yüksektir. Buna bağlı olarak, YSA ile yük tahminin de maliyet değerleri daha düşük, matematiksel yöntem ile yapılan yük tahminin de ise daha yüksek çıkmıştır. Yük tahmini analizleriyle, gerçek yük değerlerine yaklaşıldıkça, uygun birim kombinasyonlarına da ulaşılacaktır ve bu şekilde birimlerin optimum yüklenmesi sağlanacaktır.

## 5. SONUÇLAR

Güç sistemleri optimizasyonunda önemli problemlerden biri olan, birim yüklenme problemi matematiksel ve akıllı sezgisel yaklaşımlar kullanılarak çözülmüştür. Matematiksel yaklaşımlardan, gevşetilmiş Lagrange, ceza fonksiyonları, genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, MSG ve F-MSG yöntemleri; akıllı sezgisel yaklaşımlardan ise, bulanık mantık ve benzetimli tavlama yöntemleri kullanılmıştır. Genişletilmiş Lagrange ceza çarpanları, MSG ve F-MSG yöntemleri birim yüklenme probleminin çözümüne ilk defa uygulanmıştır. Ayrıca, birim yüklenme probleminin çözümü için, talep edilecek yük değerlerinin en az hata ile tahmin edilmesi gerekliliğinden dolayı, yük tahmini analizi için yeni bir matematiksel model önerilmiş ve bu analizden bulunan yaklaşık talep değerleri kullanılarak Tunçbilek termik santrali için birim yüklenme problemi yeniden çözülmüştür.

Birim yüklenme probleminin matematiksel yöntemlerle çözümünde, çözümün kalitesi bağıl ikil boşluk değerine bağlıdır. Bu değer azaldıkça çözümün kalitesi artmaktadır. Bağıl ikil boşluk değeri sistem boyutuna bağlı olarak değişmektedir, literatürdeki çalışmalar sistem boyutu arttıkça bu değer azaldığını göstermektedir. Bu çalışmada, dört birimden oluşan Tunçbilek termik santrali için ve on ile yüz birim arasında değişen diğer sistemler için MSG yöntemi ile asıl ve ikil maliyet değerleri arasında ortaya çıkan bağıl ikil boşluk değeri sıfır bulunarak optimum çözüme ulaşılmıştır. Matematiksel yöntemler arasında ele alınan sistemler için en düşük maliyet değerleri MSG yöntemi ile elde edilmiştir. Akıllı sezgisel yaklaşımlar arasında da en düşük maliyet değeri benzetimli tavlama yöntemi ile bulunmuştur. Matematiksel ve akıllı sezgisel yaklaşımlar birlikte ele alındığında ise en düşük maliyet değerine MSG yöntemiyle ulaşılmıştır.

Birim yüklenme için uygulanan yöntemler göstermektedir ki, matematiksel yöntemler ile çözüme yakınsama garanti edilebilmektedir. Matematiksel yöntemlerle problemin çözümünde, mutlaka ele alınan kısıtlar sağlanmalıdır. Alternatif çözüm yerine, matematiksel yöntemlerle sadece bir sonuç üretilmektedir. Sezgisel yöntemlerin kesin bir durma kriteri yoktur. Hesaplama süresi sistemin boyutuna bağlı olarak sezgisel yöntemler için oldukça uzun sürmektedir. Bu yöntemlerle, optimum çözüm garanti edilmeyebilir ve iyi çözüm bulmak için bir

çok parametrenin uygun bir şekilde ayarlanması gerekmektedir.

Elektrik enerjisi üretimi, iletimi ve dağıtımında enerji şirketleri ve finansal birimler açısından oldukça önemli bir konu olan yük tahmini analizi için Türkiye'deki yirmi altı yıla ait (1982-2007) gerçek tüketim değerleri kullanılarak kısa, orta ve uzun dönem analizleri için saatlik çözünürlük özelliği sağlayan birleşik bir yaklaşım önerilmiştir. İç içe geçmiş üç alt bölümden oluşan bu yöntemde, farklı matematiksel fonksiyonlar bu üç alt bölüme de uygulanarak en az hatayı veren model bulunmuştur. Diğer saatlik yük tahmini yöntemlerinden farklı olarak, bu yöntem birkaç yıl için tahmin yapabilmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar arasında da bu özelliği ile bir ilktir. Bu üç alt bölüm yıllık, haftalık ve saatlik olmak üzere farklı çözünürlüğe sahiptir. İç içe geçen alt bölümlerin her birinin basit yapısına rağmen, tahmin sonuçları makul değerlerde elde edilmiştir. Karmaşık matematiksel model çeşitleri de kullanılarak bulunan sonuçlar irdelenmiştir. Önerilen matematiksel yaklaşımın başarısını görebilmek amacıyla, 2002-2005 yıllarına ait saatlik gerçek veriler kullanılarak bu durum için ayrıca matematiksel fonksiyonlar bulunmuş ve YSA yaklaşımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Matematiksel yaklaşım, yük değerlerinin davranışına göre genel ve kesin matematiksel bir formülasyon vermiştir, YSA yaklaşımı ise, çözümü zor değişimleri başarılı bir şekilde çözmüştür. Sonuçlardan görülmüştür ki, matematiksel modelin MAPE ve RMSE değerleri hala önemli derecede düşüktür. Üstelik matematiksel model uzun dönem (gerçekte, isteğe bağlı olarak daha uzun) tahminler yapabilmektedir. Oysa YSA yaklaşımı, sürekli olarak bir önceki yılın verisine gereksinim duymaktadır. Bu iki yaklaşım ile 2002-2005 yıllarına ait saatlik gerçek yük değerleri kullanılarak 2006 yılına ait yük değerleri tahmin edilmiş ve bu değerler yardımıyla Tunçbilek termik santrali için yaklaşık yük talebi belirlenmiştir. Daha sonra, bu santral için birim yüklenme problemi ÜYK, BM, KPM, yük dengesi, dönme rezervi ve en küçük devreye giriş-çıkış süreleri kısıtları altında benzetimli tavlama, genişletilmiş Lagrange ceza fonksiyonları, MSG ve F-MSG yöntemleri kullanılarak yeniden çözülmüş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Yük tahmini analizlerinin başarısı, mevcut sistemin istatistiksel verilerinin doğru ve düzenli tutulmasına bağlıdır. Benzer şekilde, santraller için de düzgün verilerin tutulması durumunda daha iyi analiz ve doğru planlama yapılabilecektir. Yük tahmini analizleriyle, gerçek yük değerlerine yaklaşıldıkça, uygun birim

kombinasyonlarına ulařılabilecek ve bu Őekilde birimlerin optimum yūklenmesi sađlanacaktır. Talep edilecek enerjinin Őnceden belirlenmesi planlamaların buna gūre yapılması ve santrallerin uygun Őekilde yūklenmelerinin sađlanması ūlke ekonomisine būyūk katkılar sađlayacaktır.

## Kaynaklar

- [1] Wang, X ve Mcdonald, J.R., *Modern power system planning*, Mcgraw book Company, Newyork, 1996.
- [2] Wood, A.J., Bruce, F., Wollenberg, *Power generation operation and Control*, John Wiley & Sons, 1996.
- [3] Momoh, J.A., *Electric power system applications of optimization*, CRC. Press, 2001.
- [4] Saksornchai, T., Lee. W.J., Methaprayoon. K., Liao. J., Richard. J.R., “Improve the unit commitment scheduling by using the neural-network-based short-term load forecasting,” *IEEE Trans.on Industry applications*, **41**, 169-179, 2005.
- [5] Alfares, H. K. ve Nazaeruddinn, M., “Regression-based methodology for daily peak load forecasting,” *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Operations and Quantitative Management*, India, 468-471, 1999.
- [6] Meslier F., “New advances in short term load forecasting using Box and Jenkins approach,” *IEEE-PES WinterMeet*, **78**, 1978.
- [7] Hagan, M.T., Behr, S.M., “The time series approach to short term load forecasting,” *IEEE Transaction on Power Systems*, **PWRS-2**, 785-791, 1987.
- [8] Cho, M.Y., Hwang, J.C. ve Chen, C.S., “Customer short-term load forecasting by using ARIMA transfer function model,” *Proceedings of the International Conference on Energy Management and Power Delivery*, **1**, 317-322, 1995.
- [9] Amjady, N., “Short-term hourly load forecasting using time series modeling with peak load estimation capability,” *IEEE Transactions on Power Systems*, **16**, 798-805, 2001.
- [10] Abdel-Aal, R.E. ve Al-Garni, A.Z., “Forecasting monthly electric energy consumption in Eastern Saudi Arabia using univariate time-series analysis”, *Energy*, **22**, 1059-1069, 1997.

- [11] Wills, H.L. ve Tram, H.N., "Load forecasting for transmission planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, **103**, 561-568, 1984.
- [12] Girgis, A., Lee L., Settlege M. J. ve Makram, E., "Kalman filtering techniques for on-line optimal short-term forecasting for substation and total system loads," *IEEE Transaction on Power Systems*, **4**, 1989.
- [13] Park, D.C., El-Sharkawi, M.A. ve Marks, R.J., "Electric load forecasting using an artificial neural network," *IEEE Transactions on Power Systems*, **6**, 442-449, 1991.
- [14] Papalexopoulos, A.D., Hao, S. ve Peng, T.M., "An implementation of a neural network based load forecasting model for the EMS," *IEEE Transactions on Power Systems*, **9**, 1956-1962, 1994.
- [15] Khotanzad, A., Rohani, R.A. ve Maratukulam, D., "Artificial neural network short-term load forecaster-generation," *IEEE Transactions on Neural Networks*, **13**, 1413-1422, 1998.
- [16] Kandil, N., Wamkeue, R. ve Saad, M., "An efficient approach for short-term load forecasting using artificial neural networks," *Electric Power Energy Systems*, **28**, 525-530, 2006.
- [17] Mandal, P., Senjyu, T. ve Funabashi, T., "Neural networks approach to forecast several hour ahead electricity prices and loads in a deregulated market," *Energy Conversion and Management*, **47**, 2128- 2142, 2003.
- [18] Topalli, A.K., Erkmn, I. ve Topalli, I., "Intelligent Short-Term Load Forecasting in Turkey," *Electric Power Energy Systems*, **28**, 437-447, 2006.
- [19] Yalcinoz T. ve Eminoglu U., "Short term and medium term power distribution load forecasting by neural networks", *Energy Conversion and Management*, **46**, 1393-1405, 2005.
- [20] Santos, P.J., Martins, A.G. ve Pires, A.J., "Designing the input vector to ANN-based models for short-term load forecast in electricity distribution systems," *Electric Power Energy Systems*, **29**, 338-347, 2007.

- [21] Bakirtzis, A.G., Petridis, V. ve Kiartzis S.J., "A neural network short-term load forecasting model for the Greek power system," *IEEE Transactions on Power Systems*, **11**, 858-863, 1996.
- [22] Kiartzis, S.J. ve Bakirtzis, A.G., "A fuzzy expert system for peak load forecasting: application to the Greek power system," *Proceedings of the 10th Mediterranean Electrotechnical Conference*, **3**, 1097-1100, 2000.
- [23] Bakirtzis, A.G., Theocharis, J.B., Kiartzis, S.J. ve Satsois, K.J., "Short term load forecasting using fuzzy neural networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, **10**, 1518-1524, 1995.
- [24] Kurban, M. ve Başaran Filik U., "Next day load forecasting using artificial neural network models with autoregression and weighted frequency bin blocks," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **5**, 889-898, 2009.
- [25] Saini, L.M., "Peak load forecasting using Bayesian regularization, Resilient and adaptive backpropagation learning based artificial neural networks," *Electric Power Energy Systems*, **78**, 1302-1310, 2008.
- [26] Lauret, P., Fock, E., Randrianarivony, R.N., "Bayesian neural network approach to short time load forecasting," *Energy Conversion and Management*, **49**, 1156-1166, 2008.
- [27] Amin-Naseri, M.R. ve Soroush, A.R., "Combined use of unsupervised and supervised learning for daily peak load forecasting," *Energy Conversion and Management*, **49**, 1302-1308, 2008.
- [28] Tai, N., Stenzel, J. ve Wu H., "Techniques of applying wavelet transform into combined model for short-term load forecasting," *Electric Power Systems Research*, **76**, 525-533, 2006.
- [29] Yao, S.J., Song, Y.H. ve Zhang, L.Z., "Wavelet transform and neural networks for short-term electrical load forecasting," *Energy Conversion and Management*, **41**, 1975-1988, 2000.

- [30] El-Telbany, M. ve El-Karmi F., “Short-term forecasting of Jordanian electricity demand using particle swarm optimization, *Electric Power Systems Research*, **78** 425-433, 2008.
- [31] Islam, S.M., Al-Alawi, S.M. ve Ellithy, K.A., “Forecasting monthly electric load and energy for a fast growing utility using an artificial neural network” *Electric Power Systems Research*, **34**, 1-9, 1995.
- [32] González-Romera, E., Jaramillo-Morán, M.A. ve Carmona-Fernández, D., “Monthly electric energy demand forecasting with neural networks and Fourier series,” *Energy Conversion and Management*, **49**, 3135-3142, 2008.
- [33] Carpinteiro, O.A.S, Leme, R.C. ve Souza, A.C.Z., “Long-term load forecasting via a hierarchical neural model with time integrators,” *Electric Power Systems Research*, **77**, 371-378, 2007.
- [34] Hong, W.C., “Electric load forecasting by support vector model,” *Applied Mathematical Modelling*, **33**, 2444-2454, 2009.
- [35] Başaran Filik, U., Gerek, O.N. ve Kurban, M., “A novel modeling approach for hourly forecasting of long term electric energy demand,” *Energy Conversion and Management* dergisine gönderildi.
- [36] Başaran Filik, U., Gerek, O.N. ve Kurban, M., “Hourly forecasting of long term electric energy demand using a novel modeling approach,” *The Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control*, Taiwan, 2009.
- [37] Kerr, R.H., Scheidt, J.L., Fontana A.J. ve Wiley, J.K., “Unit commitment,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, **PAS85**, 417-421, 1966.
- [38] Burns, R.M. ve Gibson C.A., “Optimization of priority lists for a unit commitment program,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, 1975.
- [39] Lee, F.N., “Short-term unit commitment:a new method,” *IEEE Trans. Power Syst*, **3**, 421-428, 1988.
- [40] Shoults, R.R., Chang S.K., Helmick S. ve Grady, W.M., “A practical approach to unit commitment, economic dispatch and savings allocation for



- multiple-area pool operation with import/export constraints,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, **PAS99**, 625-635, 1980.
- [41] Lowery P.G., “Generating unit commitment by dynamic programming,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, **PAS85**, 422-426, 1966.
- [42] Dowd, P.A., “Application of dynamic and stochastic programming to optimize cut-off grades and production rates,” *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, **85**, 22-31, 1976.
- [43] Dillon, T.S., Edwin, K.W., Kochs, H.D. ve Taud, R.J., “Integer programming approach to the problem of optimal unit commitment with probabilistic reserve determination,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, **PAS97**, 2154-2166, 1978.
- [44] Sheble, G.B. ve Fahd G.N., “Unit commitment literature synopsis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **9**, 128-135, 1994.
- [45] Lauer, G.S., Sandell, N.R., Bertsekas N.R. ve Posbergh, T.A., “Solution of large scale optimal unit commitment problems,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, *PAS-101*, 79-96, 1982.
- [46] Cohen, A.I. ve Yoshimura, M., “A branch- and -bound algorithm for unit commitment,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, *PAS-102*, 444-451, 1983.
- [47] Beltran, C. ve Heredia, F.J., “Unit commitment by augmented Lagrangian relaxation: testing two decomposition approaches,” *Journal of Optimization Theory and Applications*, *112*, 295-314, 2002.
- [48] Merlin, A. ve Sandrin, P., “A new method for unit commitment at Electricite De France,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, *PAS-102*, 1218-1225, 1983.
- [49] Aoki, K., Satoh, T. ve Itoh, M., “Unit commitment in large scale power systems including fuel constrained thermal and pumped storage hydro,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **PWRS-2**, 1077-1084, 1987.
- [50] Zhuang, F. ve Galiana, F. D. , “Toward a more rigorous and practical unit commitment by Lagrangian relaxation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **3**, 763-773, 1988.

- [51] Wang, C. ve Shahidehpour, S.M., “Ramp-rate limits in unit commitment and economic dispatch incorporating rotor fatigue effect,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **9**, 1539-1545, 1994.
- [52] Takriti, S. ve Birge, J.R., “Using integer programming to refine Lagrangian-based unit commitment solutions,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **15**, 151-156, 2000.
- [53] Li, T., Shahidehpour, M. ve Z. Li, “Price-based unit commitment: A case of Lagrangian relaxation versus mixed integer programming,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **20**, 2015-2025, 2005.
- [54] Zhai, Q., Guan, X, ve Cui J., “Unit commitment with identical units: successive subproblem solving method based on Lagrangian relaxation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **17**, 1250-1257, 2002.
- [55] Ongsakul, W., Petcharaks, N., “Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **19**, 620-628, 2004.
- [56] Seki, T., Yamashita, N. ve Kawamoto, K., “New local search methods for improving the Lagrangian-relaxation based unit commitment solution,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **25**, 272-283, 2003.
- [57] Madrigal, M. ve Quintana, V.H., “An interior-point/cutting-plane method to solve unit commitment problems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **15**, 1022-1027, 2000.
- [58] Mori H. ve Matsuzaki O., “Embedding the priority into tabu search for unit commitment,” *Proc. IEEE Winter Meeting*, 2000.
- [59] Mori, H. ve Usami T., “Unit commitment using tabu search with restricted neighborhood,” *Proc. Intell. Syst. Applicat. Power Syst.*, 422-427, 1996.
- [60] Lin, W.M., Cheng F.S. ve Tsay M.T., “An improved tabu search for economic dispatch with multiple minima,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **17**, 108-112, 2002.
- [61] Mantawy, A.H., Abdel-Magid, Y.L. ve Selim S.Z., “Unit commitment by tabu search,” *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist.*, **145**, 56-64, 1998.

- [62] Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M. ve Teller A., “Equation of state calculations by fast computing machines,” *Journal of Chemical Physics*, **21**, 1087-1092, 1953.
- [63] Zhuang, F. ve Galiana, F.D., “Unit Commitment by simulated annealing,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **5**, 311-318, 1990.
- [64] Mantawy ,A.H., Abdel-Magid, Y.L. ve Selim, S.Z., “A simulated annealing algorithm for unit commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **13**, 197-204, 1998.
- [65] Mukhtari, S., Singh J. ve B. Wollenberg, “A unit commitment expert system,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **3**, 272-277, 1988.
- [66] Ouyang, Z. ve Shahidehpour, S.M., “Short-term unit commitment expert system,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 1-13, 1990.
- [67] Salam, M.S., Abdul-Razak Hamdan, A.R. ve Khalid Mohamed Nor, K. M., “Integrating an expert system into a thermal unit commitment algorithm,” *Proc. Inst. Elect. Eng.*, **138**, 553-559, 1991.
- [68] Saneifard, S., Prasad, N.R. ve Smolleck H.A., “A fuzzy logic approach to unit commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **12**, 988-995, 1997.
- [69] El-Saadawi M., Tantawi A. ve Tawfik E., “A fuzzy optimisation-based approach to large scale thermal unit commitment,” *Electric Power Systems Research*, **72**, 245-252, 2004.
- [70] Sasaki, H., Watanabe, M. ve Yokoyama, R. “A solution method of unit commitment by artificial neural networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **7**, 974-981, 1992.
- [71] Wang, C. ve Shahidehpour, S.M., “Effects of ramp-rate limits on unit commitment and economic dispatch,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **8**, 1341-1350, 1993.
- [72] Walsh, M.P. ve Malley, M.J.O. , “Augmented Hopfield network for unit commitment and economic dispatch,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **12**, 1765-1774, 1997.

- [73] Liang, R.H. ve Kang, F.C., “Thermal generating unit commitment using an extended mean field annealing neural network,” *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist.*, **147**, 164-170, 2000.
- [74] Gil, E., Bustos, J. ve Rudnick, H., “Short-term hydrothermal generation scheduling model using a genetic algorithm,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **18**, 2003.
- [75] Zoumas, C.E., Bakirtzis, A.G, Theocharis, J.B. ve Petridis, V, “A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **19**, 2004.
- [76] Rudolf, A. ve Bayrleithner, R. “A genetic algorithm for solving the unit commitment problem of a hydro-thermal power systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **14**, 1460-1468, 1999.
- [77] Swarup, K.S. ve Yamashiro, S., “Unit commitment solution methodology using genetic algorithm,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **17**, 87-91, 2002.
- [78] Uyar A. Ş. ve Türkay, B., “Evolutionary algorithms for the unit commitment problem,” *Turkish Journal of Electrical Engineering*, **16**, 3, 239-255, 2008.
- [79] Juste, K.A., Kita, H., Tanaka, E. ve Hasegawa, J., “An evolutionary programming solution to the unit commitment problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **14**, 1452-1459, 1999.
- [80] Chen, H. ve Wang, X., “Cooperative coevolutionary algorithm for unit commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **16**, 128-133, 2002.
- [81] Valenzuela, J. ve Smith A.E., “A seeded memetic algorithm for large unit commitment problems,” *Journal of Heuristics*, **8**, 173-195, 2002.
- [82] Sisworahardjo, N.S. ve El-Kaib A.A., “Unit commitment using ant colony search algorithm,” *Proc. 2002 Large Eng. Syst. Conf. Power Eng.*, 2-6, 2002.
- [83] Huang, S.J. “Enhancement of hydroelectric generation scheduling using ant colony system based optimization approaches,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, **16**, 296-301, 2001.

- [84] Su, C.C. ve Hsu, Y.Y., “Fuzzy dynamic programming: an application to unit commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **6**, 1231-1237, 1991.
- [85] Ouyang, Z. ve Shahidehpour, S.M. , “A hybrid artificial neural network-dynamic programming approach to unit commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **7**, 236-242, 1992.
- [86] Tong S.K. ve Shahidehpour S.M., “Combination of Lagrangian relaxation and linear-programming approaches for fuel constrained unit commitment problems,” *IEE Proceeding*, 162-174, 1989.
- [87] Huang, S.J. ve Huang, C.L. , “Application of genetic-based neural network to thermal unit commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **12**, 654-660, 1997.
- [88] Mantawy, A.H., Abdel-Magid Y.L. ve Selim, S.Z., “Integrating genetic algorithms, tabu search and simulated annealing for the unit commitment problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **14**, 829-836, 1999.
- [89] Padhy, N.P. “Unit commitment using hybrid models: a comparative study for dynamic programming, expert system, fuzzy system and genetic algorithms,” *Elect. Power Energy Syst.*, **23**, 827-836, 2000.
- [90] Cheng, C., Liu, C.W. ve Liu, C.C. “Unit commitment by Lagrangian relaxation and genetic algorithms,” *IEEE Trans. Power Syst.*, **15**, 707-714, 2000.
- [91] Bazaraa, M.S., Sherali, H.D., Shetty, C.M., *Nonlinear programming: theory and algorithms*, John Wiley and Sons, 1993.
- [92] Azimov, A.Y. ve Gasimov, R.N., “On weak conjugacy, weak subdifferentials and duality with zero gap in nonconvex optimization,” *Inter. Journal of Applied Mathematics*, **1**, 171-192, 1999.
- [93] Gasimov R.N., “Augmented Lagrangian duality and nondifferentiable optimization methods in nonconvex programming,” *Journal of Global Optimization*, **28**, 187-203, 2002.

- [94] Gasimov, R.N. ve Rubinov, A.M., “On augmented Lagrangians for optimization problems with a single constraint,” *Journal of Global Optimization*, **28**, 153-173, 2004.
- [95] Gasimov, R.N. ve Ustun O., “Solving the quadratic assignment problem using F-MSG algorithm,” *Journal of Industrial and Management Optimization*, **3**, 2007.
- [96] Haykin, S., *Neural networks: a comprehensive foundation*, Macmillan College Publishing Company, New York, USA, 1994.
- [97] Kaastra, I., Boyd, M., “Designing a neural network for forecasting financial and economic time series,” *Neurocomputing*, **10**, 215-236, 1996.
- [98] Goss, S., Aron, S., Deneubourg, J.L. ve Pasteels, J.M., “Self-organized shortcuts in the Argentine Ant, *Naturwissenschaften*,” **76**, 579-581, 1989.
- [99] Song, Y. ve Irving, M.R., *Optimisation techniques for electrical power systems, Tutorial: Optimisation Techniques*, 2001.
- [100] Zadeh, L.A., *Fuzzy sets, Inform Control*, **8**, 338-353, 1965.
- [101] Ferreira, L.A.F.M., “On the duality gap for thermal unit commitment problems,” *IEEE Inter Symp on Circuits and Systems*, **4**, 2204-2207, 1993.
- [102] Üstün Ö., *Kareli atama probleminin çözümü için Subgradient yöntemi*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
- [103] Gasimov, R.N. ve Üstün, Ö., “Reference point approach for cardinality constrained portfolio optimization,” *First Conference of Advanced Mathematical Methods for Finance*, April 26-29, Turkey, 2006.
- [104] Lee, C.C. , “Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Part11,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, **20**, 419-435, 1990.
- [105] Başaran Filik, U., Gerek, O.N. ve Kurban, M., “Neural and mathematical modeling approaches for hourly long term load forecasting,” *ICIC Express Letters*, **4**, 2009.

- [106] Başaran Filik, U., Gerek, O.N. ve Kurban, M., “Hourly forecasting of long term electric energy demand using novel mathematical models and neural approaches,” *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, dergisine gönderildi.
- [107] Kurban, M. ve Başaran Filik, Ü., “Birim yüklenme probleminin iki farklı ekonomik dağıtım yaklaşımı benzetimli tavlama yöntemi ile çözümlenmesi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **12**, 211-216, 2008.
- [108] Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. ve Raman R. “GAMS: a user’s guide,” GAMS Development Corporation, 1998.
- [109] Başaran, Ü. ve Kurban, M., “Genelleştirilmiş Subgradient yöntemi kullanılarak birim yüklenme probleminin çözümü,” *3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 2009.
- [110] Kurban, M. ve Başaran Filik, Ü., “Birim yüklenme probleminin üç farklı yöntem kullanılarak karşılaştırmalı çözümlenmesi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **24**, 2009.
- [111] Kurban, M. and Başaran Filik, Ü. “A comparative study of three different mathematical methods for solving the unit commitment problem,” *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, 2009.
- [112] Kurban, M. and Başaran Filik, Ü., “Fuzzy logic unit commitment based on load forecasting using artificial neural network with weighted frequency bin blocks,” *International Journal of Power, Energy and Artificial Intelligence (IJPEAI)*, **2**, 1, 77-82, 2009.