

# Yük Dağıtım Sistemlerinde Karışık Tamsayı Programlama Algoritması ile Optimizasyon

## (Optimization with Mixed Integer Programming Algorithm in Load Distribution System)

İlhan KOCAARSLAN<sup>1</sup>, Hasan TIRYAKI<sup>2</sup>

Electrical & Electronics Engineering Department, İstanbul University, İstanbul, 34100, Turkey<sup>1,2</sup>  
Phone: +90 (212) 4737290; Fax: +90 (212) 4737064, [ikarslan@istanbul.edu.tr](mailto:ikarslan@istanbul.edu.tr), [hasan.tiryaki@istanbul.edu.tr](mailto:hasan.tiryaki@istanbul.edu.tr)

**Özet—** Bu çalışmada 4 farklı tip enerji üretim santrali barındıran bir yük tevzii merkezi oluşturulmuş ve söz konusu santrallerin her birinin üretim set değerlerini belirleyebilmek amacıyla karışık tamsayı programlama algoritmasından yararlanılarak bir optimizasyon yazılımı oluşturularak benzetim yapılmıştır. Söz konusu 4 santralin bir tanesi Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali, bir tanesi Gaz Türbini Santrali, bir tanesi Fuel-Oil Türbini Santrali ve bir tanesi de Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santralidir. Bu santrallerde toplam 15 adet ünite bulunmaktadır. Çeşitliliği arttırabilmek ve daha kullanışlı bir metodoloji oluşturabilmek için gerçekleştirilen optimizasyonda üniteler baz alınmıştır. Türkiye koşullarını yansıtan bu optimizasyon yazılımına ileride kullanılmak üzere alternatif olarak karbon salınımlarını da gözeten bir bölüm eklenmiştir. Böylelikle karbon salınımlarının dikkate alınmasının elektrik üretim set değerlerinde yaptığı etki net olarak gözlenebilmiştir.

**Anahtar Kelimeler—** Yük Tevzii Merkezi, Yük Dağıtım, Karışık Tamsayı Programlama Algoritması, Optimizasyon, Enerji Üretim Set Değerleri, Karbon Salınımı

**Abstract—** In this study, four different types of power generation plants harboring a Load Dispatch Center was created and each of these production plants in order to determine the set values by using mixed integer programming algorithm optimization software by creating a simulation was performed. These 4 Natural Gas Combined Cycle Power plant one, and one Gas Turbine Power Plant, one of them, and one Fuel-Oil Turbine Power Plant is a coal-fired thermal power plant. There are a total of 15 units at these plants. To increase diversity and realized in order to create a more useful optimization methodology is based on the units. Turkey reflects the conditions of this optimization software for future use as an alternative to carbon emissions oversee a section was added. Thus, carbon emissions are taken into account the effect of the set value of the net electricity production could be observed.

**Keywords—** Load Distribution Center, Mixed Integer Programming Algorithm, Optimization, Set Value of Energy Production, Carbon Emission

### I. GİRİŞ

Enerji, genel olarak iş yapabilmek yeteneği veya potansiyeli olarak tanımlanmakla beraber, değişikliklere yol açan etken olarak da tanımlanabilir. Bilim ve teknoloji alanındaki

gelişmelerle birlikte; yaşam standartları ve tarzlarında büyük bir değişim gözlenmekte, mal ve hizmet üretim ve tüketim kalıpları, fiyatları, talep yapıları, pazar koşulları, çalışma şartları, verimlilik vb. konularında önemli değişiklikler meydana gelmekte, global ürün ve pazarlar, küresel dev organizasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu gelişme ve değişimin sürati ve yönü büyük ölçüde enerji arzı konusundaki gelişmelere bağlı bulunmakta, enerji konusu bilim ve teknoloji alanındaki çalışmaların odak noktalarından birini oluşturmaktadır [1].

Elektrik enerjisini kullananların beklentisi, bu enerjiyi istedikleri miktarda kullanabilmektir. Diğer taraftan bilindiği gibi elektrik enerjisi büyük miktarlarda depo edilememektedir. Bunun anlamı; üretimin sürekli ihtiyaç miktarında yapılması mecburiyettir. Bu durum, elektrik üretiminin devamlılığının sağlanmasının yanısıra elektrik üretimi yapan santrallerin sürekli olarak izlenmesi, üretim değerlerinin belirlenerek sürekli güncellenmesi ile elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde sistematik bir düzenin olması gerektiği sonucunu oluşturmaktadır. Bu düzenin sağlanabilmesi için her ülkede yetkili kurumlar tarafından bir optimizasyon sistemi tasarlanmıştır. Yukarıda bahsedilen sebeplerden ötürü oluşturulan optimizasyon sistemlerinin geliştirilmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur.

Bu çalışmada 4 farklı tip enerji üretim santrali barındıran bir yük tevzii merkezi oluşturulmuş ve söz konusu santrallerinin her birinin üretim set değerlerini belirleyebilmek amacıyla karışık tamsayı programlama algoritmasından yararlanılarak bir optimizasyon yazılımı oluşturularak benzetim yapılmıştır. Söz konusu 4 santralin 1 tanesi Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali, 1 tanesi Gaz Türbini Santrali, 1 tanesi Fuel-Oil Türbini Santrali ve bir tanesi de Kömür Yakıtlı Termik Elektrik Santralidir. Bu santrallerde toplam 15 adet ünite bulunmaktadır. Çeşitliliği arttırabilmek ve daha kullanışlı bir metodoloji oluşturabilmek için gerçekleştirilen optimizasyonda üniteler baz alınmıştır. Türkiye koşullarını yansıtan bu optimizasyon yazılımına ileride kullanılmak üzere alternatif olarak karbon salınımlarını da gözeten bir bölüm eklenmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde emisyon salınımlarının da dikkate alındığı durumda elde edilen değerler çarpıcıdır.

Çalışmada sırasıyla genel olarak optimizasyon modellerinin oluşturulması ve karışık tamsayı programlama metodolojisi, kullanılan sisteme ait optimizasyon modelinin oluşturulması, elde edilen optimizasyon yazılımı ile sonuçları ve karbon

salınımları için ortaya konulan metodoloji sayesinde elde edilen sonuçlar anlatılarak mevcut durum ve gelecekte oluşması muhtemel durum karşılaştırılmıştır. Böylelikle karbon salınımlarının dikkate alınmasının elektrik üretim set değerlerinde yaptığı etki net olarak gözlenebilmiştir.

## II. KULLANILAN OPTİMİZASYON MODELİ

Bu çalışmada kullanılmak amacıyla 4 santralden oluşan bir bölge tasarlanmış, saatlik bazda bölgenin toplam tüketim eğrileri ve santrallerin üretim kapasiteleri gibi veriler bilgisayar ortamında örnek senaryo oluşturmak üzere üretilmiştir. Bu çalışmada 19.09.2013 tarihinde yapılan üretimler ele alınacaktır. Bu sebeple o tarihe ait döviz kurları, yakıt fiyatları gibi bilgiler gerekli yerlerden alınıp programa girdi olarak sunulmuştur.

Benzetimi yapılacak olan gün için; toplam kurulu güçleri **1351.2 MW** olan **3** adet üniteden oluşan Ambarlı Doğalgaz Kombine Çevrim Santraline benzetilen bir adet Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali, toplam kurulu güçleri **98 MW** olan **3** adet üniteden oluşan Ak Enerji Santraline benzetilen bir adet Gaz Türbini Santrali, toplam kurulu güçleri **640.9071 MW** olan **5** adet üniteden oluşan Ambarlı Fuel-Oil Santraline benzetilen bir adet Fuel-Oil Santrali, ve toplam kurulu güçleri **1440 MW** olan **4** adet üniteden oluşan Afşin Elbistan Kömür Yakıtlı Termik Santraline benzetilen bir adet Kömür Yakıtlı Termik Santrali modellenmiştir. Bu santrallerde toplam kurulu gücü **3530.1071 MW** olan **15** ünite bulunmaktadır. Gerçek zamana yakın bir benzetim yapılabilmesi için optimizasyon yazılımında her bir ünite için farklı set değerler belirlenmiştir.

Aşağıda oluşturulan Yük Tevzii Merkezi'nde bulunan santrallere ilişkin bilgiler yer almaktadır;

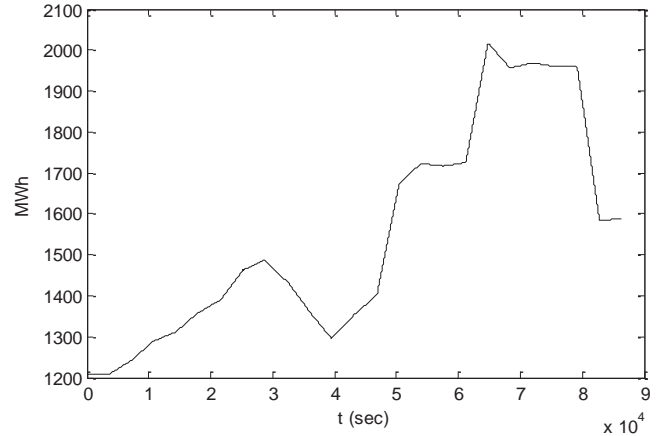
TABLO I  
SANTRAL BİLGİLERİ

Santral	Sistem	Ünite Kodu	Ünite Kurulu Gücü
1 Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali	3x(2 GT + 1 ST)	D01_U1	450.4 MW
		D01_U2	450.4 MW
		D01_U3	450.4 MW
2 Gaz Türbini Santrali	1 GT + 1 GT + 1GT	G01_U1	21.5 MW
		G01_U2	43.5 MW
		G01_U3	33 MW
3 Fuel-Oil Santrali	3 FOT + 2 FOT	F01_U1	113.6357 MW
		F01_U2	113.6357 MW
		F01_U3	113.6357 MW
		F01_U4	150 MW
		F01_U5	150 MW
4 Kömür Yakıtlı Termik Santral	4 ST	T01_U1	360 MW
		T01_U2	360 MW
		T01_U3	360 MW
		T01_U4	360 MW

Aşağıda oluşturulan Yük Tevzii Merkezi için günün her saatinde tahmin edilen tüketim değerleri ve yük eğrisi bulunmaktadır. Dikkat edilirse her bir saatteki tüketim değerleri yük tevzii merkezine bağlı bulunan santrallerin toplam kurulu gücünden daha küçük seçilmiş ve böylelikle bir optimizasyon problemi yaratılmıştır.

TABLO II  
SAATLİK TÜKETİM DEĞERLERİ (MWH)

00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12
1208	1241	1289	1311	1358	1389	1462	1487	1435	1361	1295	1353
12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
1400	1670	1723	1717	1725	2018	1956	1969	1960	1960	1584	1588



Şekil 1. Oluşturulan Yük Tevzii Merkezi için Tüketim Eğrisi

Kullanılan günlük toplam piyasa işletme maliyeti optimizasyon modelinde sadece elektrik üretim santrallerinin sisteme satış yönü dikkate alınmıştır. Ayrıca genel üretim kısıtları ve iletim sistemi kısıtları ihmal edilmiştir. Buna göre kullanılan optimizasyon modelinde elektrik üretim santrallerinin sisteme satış yönünde saatlik, blok ve esnek teklifleri ile kısmi kabul edilebilirlik durumları dikkate alınmıştır.

Saatlik tekliften kasıt hangi santralin günün hangi saatinde ne kadar üretim yapacağını ve bu enerjiyi hangi fiyatla satacağını belirtmesidir. Blok tekliften kasıt ise herhangi bir santralin belirlediği zaman aralığında belirlediği miktarda enerjiyi hangi fiyatla satacağını belirtmesidir. Son olarak esnek tekliften kasıt ise herhangi bir santralin özel bir zaman aralığı belirtmeksizin (bu zaman aralığı ihtiyaç durumuna göre enerjiyi satın alan kurum tarafından belirlenir) belirlediği miktarda enerjiyi hangi fiyatla satacağını belirtmesidir. Optimizasyon modelinin ve yazılımının temel çalışma prensibi, sistemi her bir gün için 24 saatin toplamını göz önünde bulundurarak en düşük maliyetle en etkili şekilde dengeye getirerek günün her saati için kabul edilecek teklif setinin belirlenmesini sağlamaktır. Talimat alacak olan blok, esnek ve kısmi kabul edilemeyen tekliflerin optimum şekilde belirlenmesi tamsayı değişkenlerle ilişkilendirildiğinden, optimizasyon modeli Karışık Tamsayı Programlama yönteminden yararlanmaktadır [2].

Karışık tamsayı probleminin çözümünde optimizasyon yazılımı, **dal-sınır (branch and bound) algoritması** ile **kesme düzlemi (cutting-edge) tekniğini** kullanmakta ve makul tamsayı çözümleri elde ederek, optimizasyon sürecini hızlandırmaya yönelik olarak gömülü heuristikleri (heuristics) içermektedir [3-4]. Dal-sınır algoritması ve kesit düzlemi tekniklerinin kısa açıklaması aşağıdaki gibidir:

*Dal-sınır algoritması:* Tamsayı ve karışık tamsayı programlama problemlerinin çözümünde sık kullanılan bir metottur. Dal-sınır algoritmasında; optimize edilecek olan

değişken için öngörülen alt ve üst sınırlar, problem için fizibil olan çözüm alanını oluşturur. Daha sonra, bu çözüm alanı kapsamında alt setler belirlenir. Fizibil çözümü vermeyen alt setler elenir. Optimum çözüm bulunana kadar alt setler oluşturmaya ve elenmeye devam edilir [5-6-7].

**Kesme düzlemi algoritması:** Bu metodda öncelikle, gerekli olması halinde kısıtların sağ tarafı tamsayı olacak şekilde düzenlenir ve modelin optimum çözümü bulunur. Bulunan çözüm tamsayı değil ise, optimum çözümün tamsayı bir uç noktada meydana gelmesi için kesme düzlemleri (yeni kısıtlar) eklenerek çözüm uzayı düzenlenir. Optimum tam sayılı sonuç bulunan kadar iterasyon devam eder [8-9-10].

Yukarıda verilen bilgilerin ışığında kullanılan optimizasyon modeli için belirlenmiş tanımlar aşağıdaki tabloda yer almaktadır;

TABLO III  
TANIMLAR

İndisler			
Adı	Tanımı	Tipi	Birimi
$m$	Teklif indisi	İndis	-
$t$	Zaman indisi	İndis	{0,1,...23}
Setler			
Adı	Tanımı	Tipi	Birimi
$SHO$	Saatlik satış teklif seti	Set	-
$SBO$	Blok satış teklif seti	Set	-
$SFO$	Esnek satış teklif seti	Set	-
Sistem Parametreleri			
Adı	Tanımı	Tipi	Birimi
$G_t$	$t$ saati için toplam saatlik tüketim programı	Parametre (Giriş verisi)	MWh
$D_t$	$t$ saatinde toplam saatlik üretim programı	Parametre (Giriş verisi)	MWh
Fiyat Parametreleri			
Adı	Tanımı	Tipi	Birimi
$HOP_m$	$m$ saatlik satış teklifi fiyatı	Parametre (Giriş verisi)	TL/MWh
$BOP_m$	$m$ Blok satış teklifi fiyatı	Parametre (Giriş verisi)	TL/MWh
$FOP_m$	$m$ Esnek satış teklifi fiyatı	Parametre (Giriş verisi)	TL/MWh
Saatlik Teklif Parametreleri			
Adı	Tanımı	Tipi	Birimi
$t0(m)$	$m$ saatlik teklifinin saati	Parametre (Giriş verisi)	saat
$Type(m)$	$m$ saatlik teklifinin tipi	Parametre (Giriş verisi) {0=kısmi kabul edilebilir; 1=kısmi kabul edilemez}	{0,1}
Blok Teklif Parametreleri			
Adı	Tanımı	Tipi	Birimi
$H(m)$	$m$ blok teklifinin süresi	Parametre (Giriş verisi)	saat

$t1(m)$	$m$ blok teklifinin başlangıç saati	Parametre (Giriş verisi)	saat
$t2(m)$	$m$ blok teklifinin bitiş saati	Parametre (Giriş verisi)	saat
Sürekli Karar Değişkenleri			
Adı	Tanımı	Tipi	Birimi
$HOQ_m$	$m$ saatlik satış teklifinin kabul edilen miktarı	Karar değişkeni	MWh
$BOQ_m$	$m$ blok satış teklifinin kabul edilen miktarı	Karar değişkeni	MWh
$FOQ_{m,t}$	$m$ esnek satış teklifinin $t$ saati için kabul edilen miktarı	Karar değişkeni	MWh

Üretim değerleri her saat için tüketim değerlerini karşılayabilmelidir. Bir başka deyişle toplam saatlik üretim ile toplam saatlik tüketim arasındaki fark sıfıra eşit olmalıdır. Bunun için oluşturulan kısıt denklemi aşağıda verilmiştir ;

$$(D_t - G_t) = 0 \quad (1)$$

Buna göre kullanılan günlük toplam piyasa işletme maliyeti optimizasyon modelinin hedef fonksiyonu aşağıda verilmiştir. Bu modelin çözümü için kullanılan optimizasyon yazılımına ilerleyen bölümlerde detaylı olarak değinilecektir.

$$\text{Minimize} \left\{ \sum_{m \in SHO} HOP_m \cdot HOQ_m + \sum_{m \in SBO} BOP_m \cdot H(m) \cdot BOQ_m + \sum_{m \in SFO} \sum_t FOP_m \cdot FOQ_{m,t} \right\} \quad (2)$$

### III. OPTİMİZASYON YAZILIMI

Benzetim için kullanılan optimizasyon yazılımı aslında üç ana yazılımın birbiriyle etkileşimleri ile oluşturulmuştur. Üç yazılım kullanımının amacı modüler ve etkin bir yapıya kavuşabilmektir. Söz konusu yazılımların herbirinin çıktılarını sırasıyla diğer yazılıma girdi oluşturmaktadır. Bu yazılımlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Gerçek hayatta Türkiye'deki tüm elektrik üretim santralleri, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) Genel Müdürlüğü'ne bağlı Milli Yük Tevzii Merkezi (MYTM) ile Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi (PMUM) kontrolünde online olarak kullanılan Piyasa Yönetim Sistemi (PYS) yazılımına ilgili günün öncesinde tekliflerini girmektedirler. MYTM, kişisel tecrübeler ve toplanabilen veriler ışığında ilgili günün öncesinde toplam talep miktarını yaklaşık olarak belirler. PMUM ise santral tekliflerini talep miktarına ve ekonomiklik durumuna göre analiz eder ve her bir santral için Kesinleşmiş Günlük Üretim Programını (KGÜP) belirler. Ancak söz konusu gün içinde önceden varsayılan talep miktarında artma veya azalma olabilir. Böyle bir durumda yine gün öncesinde santrallerden alınan yük alma ve yük atma tekliflerine göre Yük Alma Talimatı (YAL) veya Yük Atma Talimatı (YAT) verilebilir [11].

Optimizasyon programına sunulacak verileri oluşturmak amacıyla Sanal Dünya Yazılımını kullanılmaktadır. Bu durumda yukarıda anlatılan MYTM ile PMUM'un ve PYS yazılımının yerini makalede kullanılan optimizasyon yazılımları almaktadır.

### A. Sanal Dünya Yazılımı

Sanal Dünya Yazılımı; sisteme bağlı santrallerin gerçek hayata uygun bir şekilde tekliflerinin oluşturulmasını, verilen tekliflere göre hangi santralin ne kadar üretim yapacağını bildirilmesini ve verilen tekliflerin hangi tipte olacağını belirlemeyi sağlamaktadır.

Benzetimi yapılan 19.09.2013 tarihi için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi (BOTAS) Genel Müdürlüğü ve Türkiye Kömür İşlemeleri (TKİ) Genel Müdürlüğü internet adreslerinden temin edilen yakıt birim fiyatları yazılıma okutulur. Aşağıda söz konusu fiyatların yer aldığı tablolar yer almaktadır;

TABLO V  
FUEL-OİL BİRİM FİYATLARI [12]

	Fuel-Öil 3 Fiyatı *	Fuel-Öil 3 için ÖTV İndirimi **	Fuel-Öil 3 Net Fiyatı
19.09.2013	2.44875 TL/kg	0.237 TL/kg	2.21175 TL/kg

\* EPDK Günlük Bültenleri'nden alınmıştır.

(<https://ppbp.epdk.org.tr/Rapor/AkaryakitPaylasim/RaporSekizFirma.aspx>)

\*\* 4760 Sayılı OTV Kanunu'ndan alınmıştır.

TABLO V  
DOĞALGAZ BİRİM FİYATLARI [13]

	Doğalgaz Fiyatı*	ÖTV İndirimi **	KDV	Taşıma Bedeli	Doğalgaz Net Fiyatı
19.09.2013	0.714194 TL/Sm <sup>3</sup>	0.023000 TL/Sm <sup>3</sup>	0.128555 TL/Sm <sup>3</sup>	0.432874 TL/Sm <sup>3</sup>	1.298623 TL/Sm <sup>3</sup>

\* BOTAS tarifelerinden alınmıştır. ([http://www.botas.gov.tr/icerik/tur/dogalgaz/boruhami/dg\\_tarife.asp](http://www.botas.gov.tr/icerik/tur/dogalgaz/boruhami/dg_tarife.asp))

\*\* 4760 Sayılı OTV Kanunu'ndan alınmıştır.

TABLO VI  
KÖMÜR BİRİM FİYATLARI [14]

	Kömür Fiyatı *	KDV	Kömür Net Fiyatı
19.09.2013	0.035 TL/kg	0.0063 TL/kg	0.0413 TL/kg

\* TKİ internet sitesinden alınmıştır. (<https://www.tki.gov.tr/teki/komurfiyat.pdf>)

Yukarıda kısaca anlatılan sanal dünya yazılımının algoritması Şekil 2'de verilmiştir;

Akış diyagramında belirtilen karbon emisjonsuz ham maliyetlerin hesaplanması için kullanılan formüller de aşağıda verilmiştir;

$$\begin{aligned} \text{Ham Maliyet (TL/MWh)} &= (\text{Kurulum Maliyeti} + \text{İşletme ve Bakım Maliyeti} + \text{İletim Sistemi Kurulumu Maliyeti}) [15] \times \text{Kur}^* \times (\text{TL/USD}) \quad (3) \\ &= [16] + [\text{Yakıt Birim Fiyatı} / (\text{Verim} [17] \times \text{Yakıt Alt Isıl Değeri})] \times 1000 \end{aligned}$$

$$\text{DGKÇS Ham Maliyet} = [(17.2 + 1.9 + 1.2) \times \text{Kur}] + [[\text{YFD}(1) / (0.57 \times (1/860) \times 9727.8)] \times 1000] \quad (4)$$

$$\text{GTS Ham Maliyet} = [(45.3 + 2.7 + 3.6) \times \text{Kur}] + [[\text{YFD}(1) / (0.38 \times (1/860) \times 9727.8)] \times 1000] \quad (5)$$

$$\text{FOTS Ham Maliyet} = [(64.9 + 4.0 + 1.2) \times \text{Kur}] + [[\text{YFF}(1) / (0.38 \times (1/860) \times 11364.836)] \times 1000] \quad (6)$$

$$\text{KYTS Ham Maliyet} = [(74.1 + 6.6 + 1.2) \times \text{Kur}] + [[\text{YFK}(1) / (0.39 \times (1/860) \times 1150)] \times 1000] \quad (7)$$

Dünyada birçok ülkede uygulanan ve Türkiye'de de Kyoto sözleşmesi gereği 2015 yılından itibaren uygulanması düşünülen karbon emisyon borsasının maliyet analizlerine nasıl bir etki yapacağını incelenmesi adına ham maliyetlere karbon emisyonu maliyetleri de eklenir. Bunun için İngiltere Karbon Borsası'nda günlük değişen salınan karbonun ağırlığına göre fiyatı 2013 yılının ortalaması olarak 26.38 TL / Ton [18] alınmıştır. Buna göre karbon emisyonu maliyetleri aşağıda verilen eşitlikler yardımı ile hesaplanır;

$$\begin{aligned} \text{Karbon Emisyonu Maliyeti (TL / MWh)} &= 26.38 \text{ TL/Ton}^* \times [(\text{Salınan CO}_2 \text{ kütlesi [19] (gr/MJ)} \times 1 \text{ MWh} \times 3600 \text{ MJ}) / (\text{Santral Verimi} \times 1000000)](\text{Ton/MWh}) \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{DGKÇS Karbon Emisyonu Maliyeti} &= 26.38 \text{ TL/Ton}^* \times [(33.53 \text{ gr/MJ} \times 1 \text{ MWh} \times 3600 \text{ MJ}) / (0.57 \times 1000000)] = 5.586 \text{ TL/MWh} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{GTS Karbon Emisyonu Maliyeti} &= 26.38 \text{ TL/Ton}^* \times [(33.53 \text{ gr/MJ} \times 1 \text{ MWh} \times 3600 \text{ MJ}) / (0.38 \times 1000000)] = 8.379 \text{ TL/MWh} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FOTS Karbon Emisyonu Maliyeti} &= 26.38 \text{ TL/Ton}^* \times [(46.14 \text{ gr/MJ} \times 1 \text{ MWh} \times 3600 \text{ MJ}) / (0.38 \times 1000000)] = 11.53 \text{ TL/MWh} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{KYTS Karbon Emisyonu Maliyeti} &= 26.38 \text{ TL/Ton}^* \times [(61.59 \text{ gr/MJ} \times 1 \text{ MWh} \times 3600 \text{ MJ}) / (0.39 \times 1000000)] = 15.00 \text{ TL/MWh} \quad (12) \end{aligned}$$

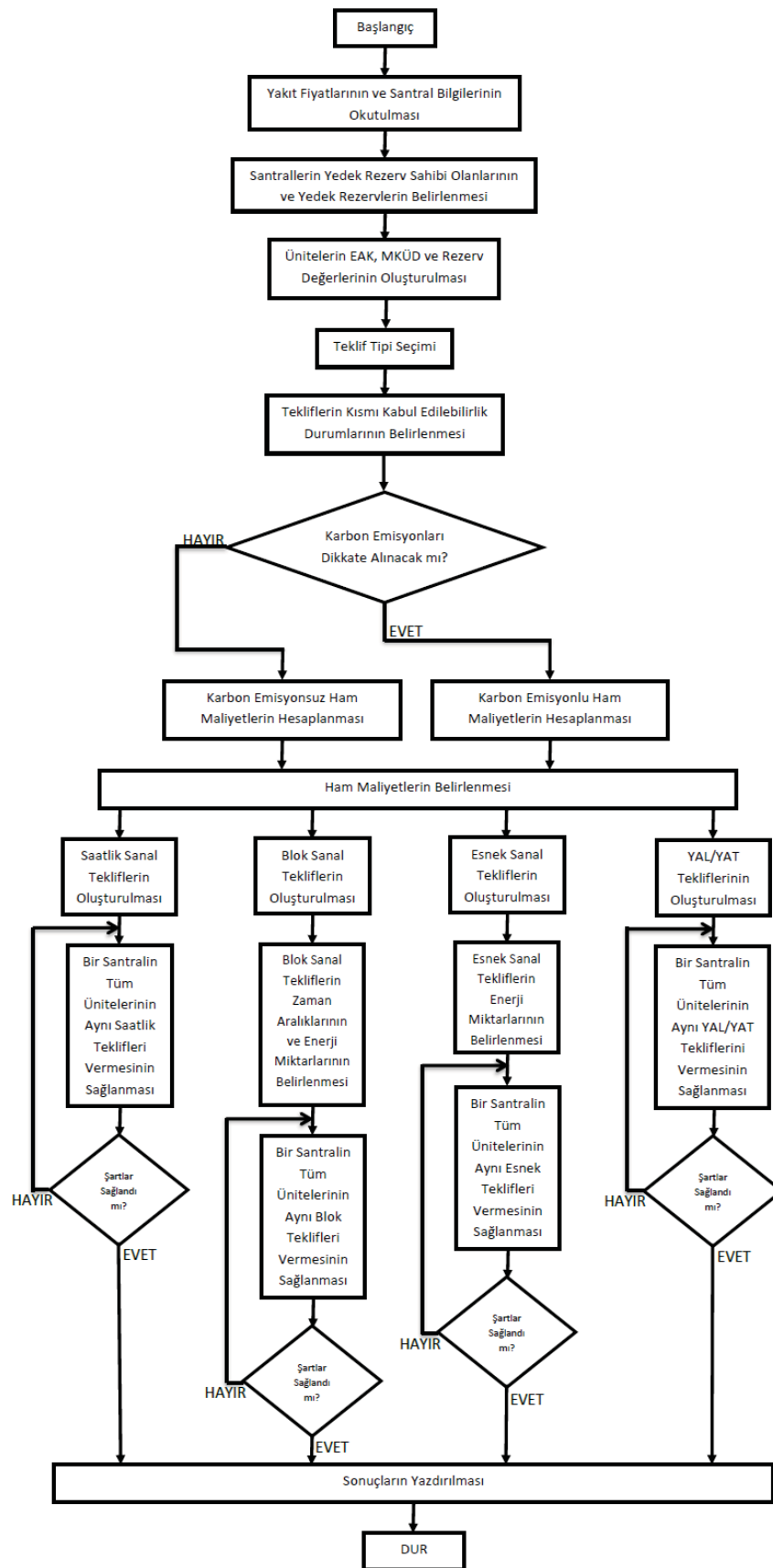
### B. Gün Öncesi Planlama Yazılımı

Gün Öncesi Planlama Yazılımı, Sanal Dünya Yazılımının çıktısı olan santral tekliflerini talep miktarına ve ekonomiklik durumuna göre analiz ederek her bir santral ünitesi için Kesinleşmiş Günlük Üretim Programını (KGÜP) belirler ve benzetim modelinde ilgili santral ünitelerine set değer olarak iletir. Yukarıda kısaca anlatılan gün öncesi planlama yazılımının algoritması Şekil 3'de verilmiştir.

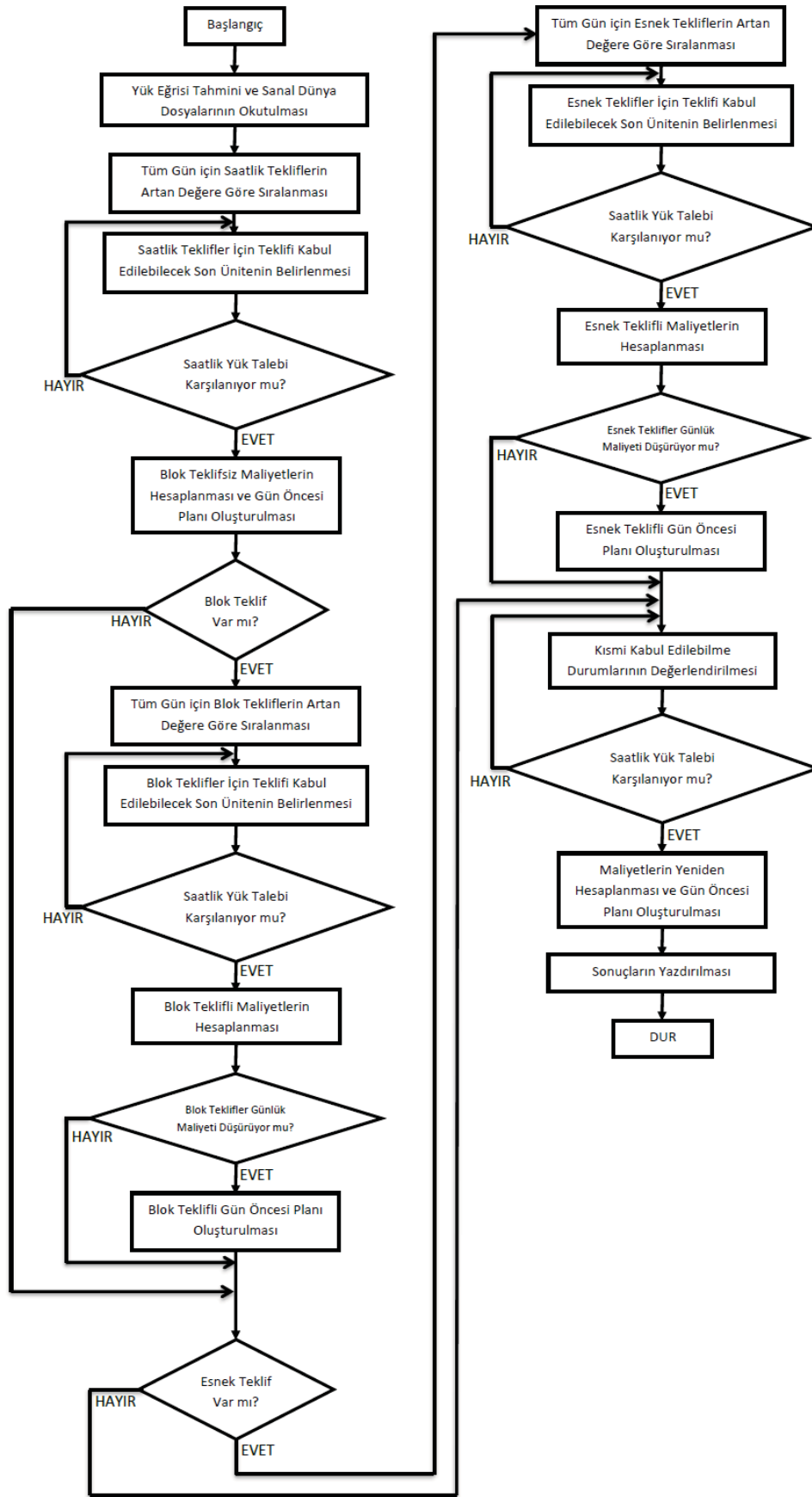
Akış diyagramından da anlaşılacağı üzere gün öncesi planlama yazılımı, önce saatlik teklifleri sonra sırasıyla blok ve esnek teklifleri değerlendirmeye alır. Son olarak ise tekliflerin kısmi kabul edilebilme durumları dikkate alınır [11].

### C. Gerçek Zamanlı Planlama Yazılımı

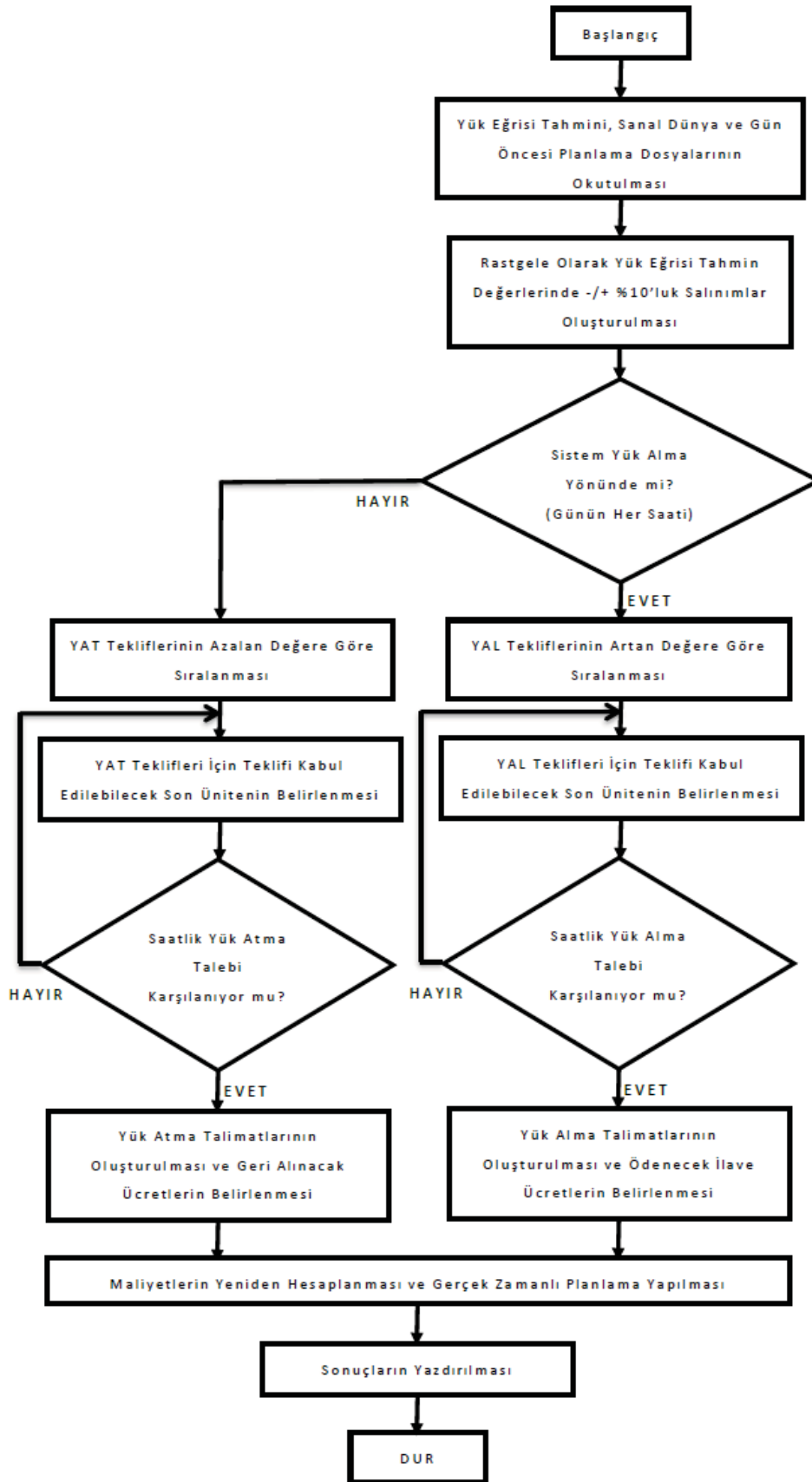
Gerçek hayata uygun bir benzetim yapılabilmesi için Gerçek Zamanlı Planlama Yazılımı tarafından daha önceden belirlenen talep miktarında saatlik bazda rastgele +/- % 10 aralığında salınımlar oluşturulur. Bu durumda Gerçek Zamanlı Planlama Yazılımı, yine Sanal Dünya Yazılımının çıktısı olan santral yük alma ve yük atma tekliflerini talep miktarında oluşan salınımlara ve ekonomiklik durumuna göre analiz ederek yedek rezervi bulunan santral ünitelerine Yük Alma Talimatı (YAL) veya Yük Atma Talimatı (YAT) verir ve benzetim modelinde ilgili santral ünitelerine güncellenmiş set değer olarak iletir. Yukarıda kısaca anlatılan gerçek zamanlı planlama yazılımının algoritması Şekil 4'de verilmiştir;



Şekil 2. Sanal Dünya Yazılımının Akış Diyagramı [20]



Şekil 3. Gün Öncesi Planlama Yazılımının Akış Diyagramı [20]



Şekil 4. Gerçek Zamanlı Planlama Yazılımının Akış Diyagramı [20]

## IV. BULGULAR

Optimizasyon yazılımlarının çıktıları daha iyi inceleyebilmek için gece, gündüz ve puant saat aralıklarından birer saat seçilmiştir. Sanal Dünya yazılımının çıktıları olarak santrallerin verdikleri saatlik, blok, esnek ve YAL/YAT sanal teklifler Gün Öncesi Planlama yazılımında değerlendirmeye alınır. Ayrıca santrallerin verdiklere tekliflere ilişkin kısmi kabul edilebilirlik durumları da dikkate alınır.

Gün öncesi optimizasyon aşamasında Fuel Oil Santrali tarafından verilen blok teklif yüksek olduğundan kabul edilmemiştir. Benzer şekilde herhangi bir esnek teklif bulunmadığı için esnek teklifler değerlendirmeye alınmamıştır.

Tahmin edilen yük ile üretilebilen enerji kavramları, benzetim modelinde kullanılan santral sayısının azlığı sebebiyle ortaya çıkmaktadır.

Kısmi kabul edilebilirlik durumu yüzünden, belirli saatlerde ihtiyaç olunan enerji üretilmemiş bu açık gerçek zamanlı optimizasyon kısmında çözülebilmştir. Simülasyonda kullanılan santral sayısının artması ya da kısmi kabul edilebilirlik durumundaki santral olmaması durumunda bu fark ortadan kalkacaktır.

Aynı sebepten ötürü karbon emisyon maliyetlerinin hesaba katılmadığı benzetimde ise birim enerji üretim fiyatı yüksek olsa dahi Doğalgaz Kombine Çevrim Santralinin birinci ve ikinci üniteleri çalıştırılmak durumunda kalmıştır.

Ayrıca karbon emisyon maliyetlerinin de hesaba katıldığı benzetimde Kömür Yakıtlı Termik Santral ünitelerinin birim enerji üretim fiyatları Doğal Gaz Kombine Çevrim Santrali ünitelerinin birim enerji üretim fiyatlarını aştığı için optimizasyon programı Kömür Yakıtlı Santraller yerine Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerini tercih etmiştir.

Son olarak Gerçek Zamanlı Planlama yazılımında elde edilen nihai değerler aşağıda sunulmuştur;

TABLO VII  
YAL/YAT OPTİMİZASYONU

	<b>YAL/YAT Optimizasyonu (MWh)</b>					
	<b>Karbon Emisyonuz</b>			<b>Karbon Emisyonlu</b>		
	Gece	Gündüz	Puant	Gece	Gündüz	Puant
	01-02	11-12	21-22	01-02	11-12	21-22
<b>D01_U1</b>	-44	-57	0	-84	-81	45
<b>D01_U2</b>	0	0	0	0	0	45
<b>D01_U3</b>	0	0	0	0	0	28
<b>G01_U1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>G01_U2</b>	0	0	0	0	0	0
<b>G01_U3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>F01_U1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>F01_U2</b>	0	0	0	0	0	0
<b>F01_U3</b>	0	0	0	0	0	0
<b>F01_U4</b>	0	0	0	0	0	0
<b>F01_U5</b>	0	0	0	0	0	0
<b>T01_U1</b>	-45	-66	36	0	0	0
<b>T01_U2</b>	0	0	36	0	0	0
<b>T01_U3</b>	0	0	36	0	0	0
<b>T01_U4</b>	0	0	9	0	0	0

TABLO VIII  
TOPLAM ÜNİTE VEKTÖRLERİ

	<b>Toplam Ünite Vektörleri (MWh)</b>							
	<b>Karbon Emisyonuz</b>				<b>Karbon Emisyonlu</b>			
	Gece	Gündüz	Puant	Toplam	Gece	Gündüz	Puant	Toplam
	01-02	11-12	21-22	00-24	01-02	11-12	21-22	00-24
<b>D01_U1</b>	225	0	405	5363	321	324	450	9861
<b>D01_U2</b>	0	0	259	1421	405	405	450	9994
<b>D01_U3</b>	0	0	0	0	405	405	433	9854
<b>G01_U1</b>	0	0	0	0	21	21	21	483
<b>G01_U2</b>	0	0	0	0	0	43	43	912
<b>G01_U3</b>	0	0	0	0	0	32	32	573
<b>F01_U1</b>	0	0	0	0	0	0	0	506
<b>F01_U2</b>	0	0	0	0	0	0	0	57
<b>F01_U3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>F01_U4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>F01_U5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>T01_U1</b>	279	258	360	7943	0	0	324	3380
<b>T01_U2</b>	324	324	360	7995	0	0	324	1628
<b>T01_U3</b>	324	324	360	7965	0	0	0	0
<b>T01_U4</b>	0	324	333	6561	0	0	0	0



TABLO IX  
MALİYETLER

	Maliyetler (TL)							
	Karbon Emisyonuz				Karbon Emisyonlu			
	Gece	Gündüz	Puant	Toplam	Gece	Gündüz	Puant	Toplam
	01-02	11-12	21-22	00-24	01-02	11-12	21-22	00-24
Saatlik Tekliflerle Maliyet	327293,4	373146,6	565070,1	10326086	337133,4	385270,4	587586,9	10694975
Saatlik Ve Blok Tekliflerle Maliyet	327293,4	373146,6	565070,1	10326086	337133,4	385270,4	587586,9	10694975
Saatlik, Blok ve Esnek Tekliflerle Maliyet	327293,4	373146,6	565070,1	10326086	337133,4	385270,4	587586,9	10694975
Kısmi Kabul Edilebilirlik Durumuyla Maliyet	327724,1	373146,6	565070,1	10327943	339356,7	390288	605356,7	11300734
YAL/YAT Durumlarıyla Maliyet	309532	349488	600134,7	10362967	321735,2	374295,4	641759,6	11321874

TABLO X  
ATMOSFERE SALINAN KARBON MİKTARLARI

	Atmosfere Salınan Karbon Miktarları			
	Karbon Emisyonuz		Karbon Emisyonlu	
	Günlük Üretim (MWh)	Karbon Salınımı (gr/MWh)	Günlük Üretim (MWh)	Karbon Salınımı (gr/MWh)
D01_U1	5363	647.357.004	9861	1.190.301.588
D01_U2	1421	171.526.068	9994	1.206.355.752
D01_U3	0	0	9854	1.189.456.632
G01_U1	0	0	483	58.301.964
G01_U2	0	0	912	110.085.696
G01_U3	0	0	573	69.165.684
F01_U1	0	0	506	84.048.624
F01_U2	0	0	57	9.467.928
F01_U3	0	0	0	0
F01_U4	0	0	0	0
F01_U5	0	0	0	0
T01_U1	7943	1.761.153.732	3380	749.427.120
T01_U2	7995	1.772.683.380	1628	360.966.672
T01_U3	7965	1.766.031.660	0	0
T01_U4	6561	1.454.731.164	0	0
	<b>TOPLAM (gr):</b>	<b>7.573.483.008</b>	<b>TOPLAM (gr):</b>	<b>5.027.577.660</b>

Maliyet tabloları incelendiğinde, görülebildiği gibi kullanılmayan blok ve esnek tekliflerin maliyete hiç bir katkısı yoktur. Asıl maliyet farkları kısmi kabul edilebilirlik şartları yüzünden pahalı elektrik alımı sebebiyle kısmi kabul edilebilirlik kısmında görülebilmektedir. Ayrıca YAL/YAT durumları da her zaman enerji alımı yapan şirket için zarara sebep olacağından maliyetleri arttırmaktadır.

## V. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yukarıda özetlenen çalışma sistemine sahip benzetim ve optimizasyon yazılımlarının hali hazırda kullanılan yazılımlara göre avantajlarından bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- Dünyada birçok ülkede uygulanan ve ülkemizde de Kyoto sözleşmesi gereği 2015 yılından itibaren uygulanması düşünülen karbon emisyon borsasının maliyet analizlerine nasıl bir etki yapacağını incelenebilir olması,
- PYS yazılımında kullanılan santral bazlı planlama yerine ünite bazlı planlama algoritmasına sahip olması ve böylelikle çok sayıda kombinasyonun bir arada incelenebilmesi,
- Santral tekliflerini almadan önce teklifleri toplayan kuruma yaklaşık maliyet analizi yapabileme imkanı sunması,

- Modüler bir yapıya sahip olduğu için farklı bölgelerin yük tevzii merkezleri ve veriler tam anlamıyla sağlanabilirse MYTM için uyarlanabilir olması,
- Özellikle özel sektör elektrik üretim şirketleri için tercih edilen bölgede kuracakları yeni bir santralin istenilen zaman aralığında maliyet analizlerini yapabileme imkanı sunması

Bu artılar göz önüne alındığında optimizasyon yazılımının hali hazırda kullanılan optimizasyon yazılımlarındaki gibi santral bazlı değil ünite bazlı çalışması, sistemde yer alan elektrik üretim santrallerinin daha verimli çalışmasını sağlayacaktır. Ayrıca optimizasyonun makalede bahsedilen sanal dünya yazılımı yardımıyla kullanılması ile yapılacak yatırımlarda ve karbon emisyonu borsasının Türkiye’de uygulanması durumunda oluşabilecek tüm senaryolar izlenebilir.

Santral bazlı optimizasyon yapıldığında toplam elektrik maliyeti ünite bazlı optimizasyona göre daha düşük olacaktır. Ancak ünite bazlı optimizasyonda tüm ünitelerin Minimum Kararlı Üretim Düzeyi (MKÜD) ve Emre Amade Kapasitesi (EAK) değerleri göz önüne alındığı için hiçbir üniteye MKÜD seviyesinden daha aşağıda üretim yapması talimatı gönderilmez. Ünitelerin zorlanmadan çalıştırılması sebebiyle bakım-onarım maliyetleri ve arıza yapma sıklıklarının düşürülmüş ve böylelikle elektrik üretiminin devamlılığı

garantiye alınmış olur. Bu durum da başlangıçta daha fazla olan maliyetin uzun vadede daha avantajlı olmasını sağlar.

Optimizasyon yazılımlarının çıktılarında da anlaşılacağı gibi karbon emisyonu maliyetleri göz önüne alındığında ulaşılan maliyetler karbon emisjonsuz maliyetlere göre daha fazladır. Ancak Tablo 10'da görülen atmosfere salınan karbon miktarları incelendiğinde karbon emisjonsuz benzetim sonucunda atmosfere yaklaşık olarak **7,573 ton** karbon salınırken, karbon emisyonu maliyetleri göz önüne alındığında yapılan optimizasyon sayesinde atmosfere salınan karbon miktarı yaklaşık olarak **5,028 ton** civarında kalmıştır. Bir başka deyişle karbon emisyonu maliyetleri göz önüne alındığında yapılan optimizasyon atmosfere salınan karbon emisyonunu **%34** oranında düşürmüştür. Sonuçlardan da anlaşılabilir gibi günümüzde öneminin her geçen gün arttığı çevre duyarlılığı konusunda bu tip çalışmaların yapılması elzemdir.

## VI. KAYNAKLAR

- [1] Bilen, H., "Kombine Çevrimli Santral Tasarımı", Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri. Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2000.
- [2] Schmitt, A., Verstege, J. F., "A Multi-Criteria Optimization of Ancillary Services in a Competitive Energy Market", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 1061–1066, USA, 28 January-1 February 2001
- [3] Williams, H.P., "Model Building in Mathematical Programming", 4. baskı, Wiley, New York, NY, 1999.
- [4] NEOS Optimizasyon Rehberi, <http://www-fp.mcs.anl.gov/otc/Guide/index.html> 07.02.2006.
- [5] Land, A.H., Doig, A. G., "An automatic method for solving discrete programming problems", *Econometrica* 28, 497-520, 1960.
- [6] Dakin, R. J., "A Tree Search Algorithm for Mixed Integer Programming Problems", *Computer Journal*, 8,3, 250-255, 1965.
- [7] Wang, X., Song, Y. H., Lu, Q., "A Coordinated Real Time Optimal Dispatch Method for Unbundled Electricity Markets", *IEEE Transactions on Power Systems*, 17, 482–490, 2002.
- [8] Gomory, R.E., "Outline of an Algorithm for Integer Solution to Linear Programs", *Bulletin of the American Mathematical Society*, 64, 275-278, 1958.
- [9] Johnson, E.L., Nemhauser, G.L. , Savelsbergh, M.W.P., "Progress in Linear Programming Based Branch-and-Bound Algorithms: An Exposition", *INFORMS Journal on Computing*, 12, 2-23, 2000.
- [10] Chand, P., Sugianto, L. F., "Co-Optimization of Energy Market and Ancillary Services", *Power Engineering Conference*, 1001–1006, USA, 12-16 June 2005.
- [11] 14 Nisan 2009 tarihli ve 27200 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği.
- [12] <https://ppbp.epdk.org.tr/Rapor/Akaryakit/Paylasim/RaporSekizFirma.aspx> 19.09.2013
- [13] [http://www.botas.gov.tr/icerik/tur/dogalgaz/boruhatti/dg\\_tarife.asp](http://www.botas.gov.tr/icerik/tur/dogalgaz/boruhatti/dg_tarife.asp) 19.09.2013
- [14] <https://www.tki.gov.tr/teki/komurfiyat.pdf> 19.09.2013
- [15] <http://www.tcmb.gov.tr/kurlar/201309/19092013.html> 19.09.2013
- [16] U. S. Energy Information Administration, "Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2012", Washington, July 2012.
- [17] EurElectric, "Efficiency in Electricity Generation Report", Brussels, July 2003.
- [18] İngiltere Karbon Borsası <http://www.pointcarbon.com/productsandservices/carbon/> 19.09.2013
- [19] U.S. Energy Information Administration, Documentation for Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2005, DOE/EIA-0638 (2005), October 2007, Tables 6-1, 6-2, 6-4, and 6-5.
- [20] Tiryaki, H., "Modern Kontrol Yöntemlerinin Yük Dağıtım Sistemlerinde Uygulanması", İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri. Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 2013.