

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ KOJENERASYON SİSTEMLERİNDE YÜK PLANLAMASI İLE
ÜRETİM PLANLAMASI ENTEGRASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Meltem KUNT

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim

Programı : Herhangi Program

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ KOJENERASYON SİSTEMLERİNDE YÜK PLANLAMASI İLE
ÜRETİM PLANLAMASI ENTEGRASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Meltem KUNT
(507111116)**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gülgün Kayakutlu
Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim
Programı : Herhangi Program**

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507111116 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Meltem KUNT**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ENERJİ KOJENERASYON SİSTEMLERİNDE YÜK PLANLAMASI İLE ÜRETİM PLANLAMASI ENTEGRASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Gülgün KAYAKUTLU**

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Tufan Vehbi KOÇ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Barış SELÇUK

Bahçeşehir Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın varolabilmesi için bakış açısı kazanmamı sağlayan, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Gülgün Kayakutlu'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Çalışmanın uygulanabilmesi için desteklerini esirgemeyen ICRON Technologies ailesine çok teşekkür ederim.

Çalışma süresince, öncesinde ve sonrasında anlayışlarını ve ilgilerini esirgemeyen dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

Aralık 2014

Meltem Kunt
(Endüstri Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. SANAYİDE KOJENERASYON KULLANIMI	3
2.1 Tanımlar ve Kavramlar	3
2.2 Türkiyede Kojenerasyon Kullanımının Gelişimi	4
2.3 Enerji Üretiminde Dengeleme.....	8
2.4 Kojenerasyon Kullanan Sektörler	11
2.5 Gün Öncesi Fiyatlandırma	20
3. YÖNTEM.....	23
4. MATEMATİKSEL MODEL	33
4.1 Karar Değişkenleri ve Parametreler	34
4.1.1 İndisler	34
4.1.2 Parametreler	34
4.1.3 Karar Değişkenleri	35
4.2 Kısıtlar	35
4.3 Amaç Fonksiyonu	37
4.4 Matematiksel Model.....	37
5. UYGULAMA.....	39
5.1 Hayat Kimya	39
5.2 Enerji Kaynakları	40
5.2.1 Gaz Türbini	40
5.2.2 Brülör	42
5.2.3 Buhar Kazanı.....	42
5.2.4 Eko-Chiller.....	42
5.2.5 Brülörlü Kazan.....	42
5.3 Üretim Talepleri	42
5.4 Hayat Enerji Problemine Entegre Model	43
5.5 Model Çıktıları	49
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
6.1 Çalışmada Sonucunda Elde Edilenler	51
6.2 Çalışmanın Enerji Üretimine Katkıları.....	51
6.3 Geliştirme Önerileri.....	52
KAYNAKLAR	53

KISALTMALAR

BF	: Birden fazla
Btm	: Belirtilmemiş
CHCP	: Combined Heating, Cooling and Power
CHP	: Combined Heating and Power
Ç	: Çevresel
D	: Diğer
E	: Ekserjetik
Ek	: Ekonomik
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
F	: Fosil
GT	: Gaz türbini
H	: Hibrit
K	: Kentsel
KM	: Kağıt makinesi
MIP	: Mixed Integer Programming
MW	: Megawatt
S	: Sektör
SEDAŞ	: Sakarya Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
Y	: Yenilenebilir
K	: Kentsel

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Kojenerasyon ile Sağlanan Enerji Tasarrufunun Sektörlere Göre Dağılımı.	7
Çizelge 3.1: Literatür Taraması.	31
Çizelge 5.1: Ortalama Maliyet Hesabı.	40
Çizelge 5.2: KM1 Üretim Bilgileri.	43
Çizelge 5.3: KM2 Üretim Bilgileri.	44
Çizelge 5.4: Puant Sistemi Elektrik Fiyatları.	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kojenerasyon sistemi genel yapısı.....	3
Şekil 2.2: Türkiye kojenerasyon tesisleri kapasite gelişimi.....	5
Şekil 2.3: Avrupa'da kojenerasyon uygulamalarının sektörlere göre dağılımı	6
Şekil 2.4: Türkiye'de kojenerasyon uygulamalarının sektörlere göre dağılımı.....	6
Şekil 2.5: Denge Modelleri-Çalışma Sayısı.....	19
Şekil 2.6: Sektör-Çalışma Sayısı Dağılımı.....	20
Şekil 3.1. Dal Sınır Algoritması Örneği.....	24
Şekil 3.2. Kesme Düzlemi Algoritması.....	24
Şekil 3.3. Dal- Kesme Algoritması Yapısı.....	25
Şekil 4.1. Sistem Tasarımı.....	33
Şekil 5.1: Örnek Türbin Verim Eğrisi.....	41
Şekil 5.2: Gaz Türbini Yapısı.....	41
Şekil 5.3: Tesis Tasarımı.....	46
Şekil 5.4. Karar Değişkeni Tanımlama.....	48
Şekil 5.6. Amaç Fonksiyonu ve Çözüm.....	49

ENERJİ KOJENERASYON SİSTEMLERİNDE YÜK PLANLAMASI İLE ÜRETİM PLANLAMASI ENTEGRASYONU

ÖZET

Sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve enerji kullanım verimliliğinin artırılması, enerji ithal eden ülkeler için kritik önem taşımaktadır. 2012 BP raporuna göre elektrik ve doğal kullanımının %48'i endüstriyel kullanım kaynaklıdır. Endüstriyel kullanımlar dikkate alındığında, kojenerasyon ve trijenerasyon sistemlerinin kurulumu önem kazanmaktadır. Bu sistemler elektrik ve ısı tüketiminin yüksek olduğu sektörlerde hem enerji maliyeti hem de üretim kalitesi açısından avantaj sağlamaktadır.

Avrupa Birliği Enerji Verimliliği 2012 raporuna göre, kojenerasyon sistemlerinin dünya enerji ihtiyacının yalnızca %9'unu karşılamaktadır. Ayrıca, aynı raporda kojenerasyon kullanımının, elektrik ve ısıyı ayrı ayrı üretilmesi durumundaki maliyetlerin %30 ile %50 oranında azalttığı vurgulanmaktadır. Bu sayılar incelendiğinde kojenerasyon kullanımının özendirilmesi sürdürülebilirlik açısından zorunlu görülmektedir.

Yakın dönemde, birçok araştırmacı kojenerasyon sistemlerin çizelgelenmesi yöntemlerini araştırmıştır. Geçmiş çalışmalara göre, türbinlerin ihtiyaçlarının belirlenmesi ve buna bağlı olarak türbinlerin kapasite kullanımlarının planlanması önemli faydalar sağlamaktadır. Aynı zamanda, şebekeye satılacak enerji miktarının doğru belirlenebilmesi ekonomik kazanç sağlayacaktır.

Literatürde kojenerasyon planlanması için farklı yöntemlere rastlanmaktadır. Bu yöntemlerden karma tamsayı programlama, doğrusal ve doğrusal olmayan programla ve genetik algoritma sıkça kullanılan yöntemlerdendir. Bu modeller ekserjetik, çevresel ve ekonomik kısıtları dikkate alan çalışmalar olarak gruplanabilir.

Bu çalışmada, toplam enerji maliyetinin en küçüklenmesi karma tam sayılı programlama yöntemi ile modellenmektedir. Önerilen model hem kojenerasyon kullanarak enerji üretimini hem de üretim sisteminin çalışma parametrelerini belirlemede kullanılacaktır. Çalışma, üretim ve enerji planlamasını birlikte alarak yeni bir model ortaya koymayı hedeflemektedir.

Enerji piyasası değişimleri karar vermeyi doğrudan etkileyecektir. Oluşturulan model, enerji piyasası dinamiklerini dikkate alarak ısı ve elektrik maliyetlerini azaltırken, enerji kullanım verimliliğini arttıracak, üretim maliyetlerini azaltacaktır. Çalışma sonucunda elde edilecek modelin uygulanması ile enerji maliyetlerinin %8 ile %15 arasında azaltılması öngörülmektedir.

Ayrıca, Şebekeye elektrik satışı kararları alınırken model yol gösterici olacaktır. Böylece gün öncesi satış fiyatları tahminine göre Şebekeye satılması en olurlu olan miktar belirlenebilecektir. Sistem ihtiyaçları dikkate alınarak kojenerasyon planlaması yapıldığında, Şebekeye aktarılabilir miktarlar kısıtlı kapasite altında belirlendiği için cezai durumların nne geilecektir.

LOADING AND PRODUCTION PLANNING IN ENERGY COGENERATION SYSTEMS

SUMMARY

Supplying sustainable energy resources and improving energy usage efficiency has critical importance for countries depending on energy import. According to 2012 BP report, 48 % of both electricity and natural gas consumption are based on industrial usage. Because of the amount of industrial energy usage, cogeneration and trigeneration systems getting more important.

Cogeneration systems are more efficient than traditional systems about %30-%45. Cogeneration and trigeneration investments have 12-20 years economical life. According to World Energy Committee Turkish Council, investment cost of cogeneration is 890,000 €. According to cost and benefit analysis, return of investment is in almost 2.6 years.

Cogeneration installations start at the beginning of the 20th century. First applications begin with facility constructions at city centers for residential heating. Cogeneration usage has grown fast in countries those have central heating systems. Countries with liquid heating like USA, use high pressured hot steam for residential heating. %30 and %80 of heating requirements of Scandinavian countries is supplied by cogeneration usage.

Although cogeneration supplies both cost and production quality advantages for sectors with high power and heat consumption, usage rate is not high enough. European Union Energy Efficiency 2011 Report states that cogeneration systems responds 9% of global energy demand only. Additionally, the report emphasizes that using cogeneration instead of producing heat and electricity separately, reduces the energy costs about 30-50%. There is a lot to be done to encourage cogeneration more.

Usually natural gas is used for cogeneration systems. Because of combustion characteristic, low emission level and low cost, natural gas is mostly preferred. Propane is alternative with lower combustion efficiency. Renewable resources are also used for cogeneration and trigeneration systems.

In Turkey, cogeneration constructions are 50 years old. After the energy policy change in 1984, private sector producers are allowed to produce energy. Textile, pulp, petro-chemical and food producers prefer cogeneration plants.

Planning of cogeneration system includes different kinds of problems. Minimization of fuel consumption, minimization of operating costs are examples for these problems. Different researchers plan cogeneration scheduling, lately. Studies state that, defining requirements per turbines and allocation capacity of turbines provides incremental benefits. Moreover, planning the amount of power that will be traded with the grid will also provide economic advantages.

Literature review shows that different methods are used for cogeneration planning. Mixed integer programming, linear programming, non-linear programming and genetic algorithms are mostly used techniques. Models are based on exergetic, environmental and economic constraints.

In this study, planning cogeneration system and production facility integrated to cogeneration system is modeled. The research includes relation between power supplier and the grid. Total energy cost minimization will be accomplished by using a Mixed Integer Programming (MIP) method. The proposed mathematical model considers both planning the power generation using a cogeneration system and manufacturing parameters. This study is original in developing a system for combined schedules that can be updated interactively either from the energy or manufacturing sites.

Proposed math model will present minimizing heat and energy costs, increasing energy efficiency and decreasing manufacturing costs, via updating production plans according to the energy market. Model goals to plan optimum working regime for a day, hourly.

Within the scope of the model, different types of resources like turbines, boilers and steam boilers for energy production. Types of resources are defined according to input and output characteristics. Turbines produce electricity, hot exhaust gas and steam by using fuel. Boilers use fuel and produce hot exhaust gas. Steam boilers use fuel and produces steam.

Objective function of the model considers, cost of power acquisition, cost of fuel, cost of restarting turbines and income from power sales to grid.

Energy demand of production processes can be defined by a function. These function considers machine and product characteristics as inputs. These characteristic initiate the power demand of the machine, machine speed, steam pressure and grammage for pulp industry. These characteristic define a production process alternative. The model decides the production process according to optimal energy production level.

Constraints are related to pulp production system, cogeneration system and physical restrictions. There is a constraint to supply using a resource for single production process in a period. Energy demand can be supplied by producing and converting energy. Converting is possible for steam requirements. Steam requirements differentiates according to pressure level of level. Steam at high level pressure can be converted to low level pressure. When energy production and/or conversion is not enough to supply demands, acquisition is possible.

Production facility design directly effects energy production alternatives. For example, when a specific production machine which uses hot exhaust gas is used, at least one of related energy production resources must be used.

The important paper tissue producer of Turkey is selected for the application of the model. Hayat Kimya Holding has pulp/tissue, hygiene and chemical facilities in İzmit, Turkey. Energy demand of this campus is supplied through four natural gas turbines, six boilers and a steam boiler.

The facility has 32 MW power production capacity. Pulp factory is the main customer of cogeneration system. The remaining power from the campus demand is sold to grid. Amount of power to sell should be declared to grid.

The mathematical model supports decisions on detailed 24 hour regime for turbines, amount of power to be exported to the grid, reaction for differentiating pulp types and best schedule for the dynamic pulp production.

It is observed that implementation of integrated plans reduces energy costs 8%-15%, by responding energy requirements of the manufacturing site fully.

Achievements of his study also avoid the penalties applied by the state energy department. This solution for integrated planning in a manufacturing to stock site is expected to be encouraging for cogeneration usage. By encouraging cogeneration usage, dependency on energy importation will decrease.

1. GİRİŞ

Dünyada enerji verimli sistemlerin arayışları devam etmektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler incelendiğinde, toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmı endüstriyel kullanımdan kaynaklanmaktadır (Somasundaram & Parker, 1999). Üretim amaçlı kullanımlar incelendiğinde, kojenerasyon sistemleri önem kazanmaktadır (Aras, 2003). Kojenerasyonun yükselişi ile birlikte, bu sistemin planlanması yanıtlanması gereken bir soru olacaktır. Kullanılan enerji miktarlarının en küçüklenmesi, işletme maliyetlerinin düşürülmesi konuları oluşan planlama probleminin temelini oluşturmaktadır. Kojenerasyon sistemlerinin planlanmasına dair çalışmalar incelendiğinde kojenerasyon sistemini ve ilgili üretim sistemini entegre olarak planlama ihtiyacının söz konusu olduğu görülmektedir. Bu tespitten yola çıkılarak, mevcut üreticilerin çalışma koşulları ve sistemlerindeki eksikler incelendiğinde entegre planlama alt yapısının eksikliği kendini belli etmektedir.

Bu çalışmada, kojenerasyon sistemlerinin dahil oldukları üretim tesisi ile bütünleşik olarak planlanmasını sağlayacak yöntemin araştırılması hedeflenmiştir. Uygulama bir kağıt üretim tesisinin entegre kojenerasyon sistemini optimize etmek üzere gerçekleştirilmiştir. Söz konusu tesis Türkiye'nin önemli temizlik kağıdı üreticilerindendir. Bu üreticinin tesislerinde mevcut 4 adet gaz türbini bulunmaktadır. Kağıt üretiminde kağıdın kurutulması aşamasında yüksek miktarda ısı ve buhara ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda ilgili tesisin ve aynı kampüs içerisinde bulunan aynı holdinge ait diğer tesislerin elektrik, ısı ve elektrik ihtiyaçları bu türbinler aracılığı ile karşılanmaktadır. Bir diğer talep noktası da Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş. (SEDAŞ)'dir. Tesis ürettiği elektriğin bir kısmını yıllık sözleşme miktarlarını sağlayacak şekilde SEDAŞ'a satmaktadır.

Çalışma sonucunda kağıt üretimine entegre kojenerasyon sistemleri için, üretim enerji ihtiyaçlarını karşılama ve şebekeyle enerji alış-satış kararlarını verirken maliyeti en küçükleyecek karma tamsayı bir matematiksel model ortaya konacaktır.

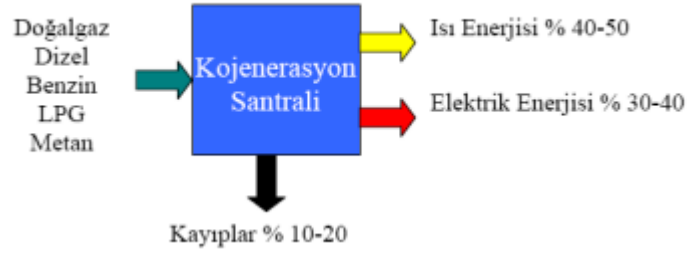
Bu çalışmada, ikinci Bölümde kojenerasyon tanımına, Türkiye’de kojenerasyon kullanımına ve literatürde yer alan konuyla ilgili çalışmalara değinilecektir. nc bölümde yöntem olarak kullanılan karma tamsayılı modelleme ile ilgili genel bilgi verilecektir. Dördüncü bölümde planlama problemini çözmede kullanılabilecek matematiksel model önerilecektir. Elde edilen modelin mevcut kojenerasyon sistemine uygulaması beşinci bölümde aktarılacaktır. Altıncı bölümde ise çalışmanın sonuçları ve gelecekte çalışmanın ne şekilde geliştirilebileceği belirtilmiştir.

2. SANAYİDE KOJENERASYON KULLANIMI

2.1 Tanımlar ve Kavramlar

Kojenerasyon doğal gaz çevrim santrali olarak da tanımlanabilmektedir. Bu kavram tek sistem içerisinde tek bir yakıttan eş zamanlı olarak hem elektrik hem de ısı üretilen sistemleri tanımlamak için kullanılmaktadır (“Kojenerasyon Nedir?,” 14.03.2013)

Geleneksel sistemlere göre %30-%45 oranında verim artışı sağlamaktadır. Yakıt enerjisinin yaklaşık %40’ı ısı enerjisine, %30’u da elektrik enerjisine dönüşmektedir. Şekil 2.1’de kojenerasyon sistemlerinin genel yapısı belirtilmiştir.



Şekil 2.1: Kojenerasyon sistemi genel yapısı.

Kojenerasyon sisteminin çalışma adımları aşağıdaki gibidir:

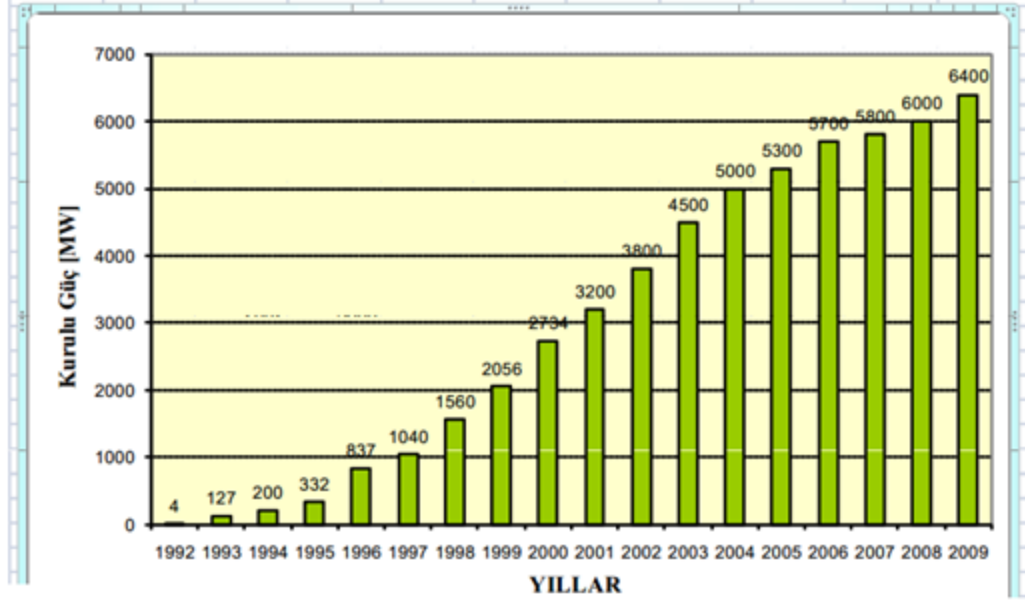
- 1- Yakıt basınçlı havanın bulunduğu yanma hücresinde yakılır.
- 2- Yanma sonucu oluşan 1000-1100 °C sıcaklıktaki gazlar gaz türbininin dönmesini sağlar.
- 3- Türbinin dönmesi sonucu dönme enerjisi elektrik enerjisine çevrilir.
- 4- Türbinden çıkan atık ısı yaklaşık 500-600 °C sıcaklığındadır. Kazana gelerek buhar üretimini sağlar.
- 5- Buhar ısınma, sıcak su ihtiyaçlarında kullanılabilir ya da uygun basınç seviyesinde ise buhar türbinine gönderilerek elektrik enerjisine çevrilebilir (“Tarihsel Gelişim,”14.03.2013.).

Kojenerasyon sistemlerinin ekonomik ömürleri 12-20 yıl arasında değişmektedir (“Kojenerasyon Sistemi,” 13.03.2013.). Bu sistemlerin yatırım maliyetlerini 2 ile 4 yıl süresinde karşılması beklenmektedir. Dünya Enerji Komitesi Türk konseyinin yayınladığı bir örnek çalışmada 2011 yılında kojenerasyon tesisi yatırım maliyeti 890.000 € olarak hesaplanmıştır (Kubilay, 1.3.2013) . Bu çalışmada bakım giderleri, yağ tüketimleri, yağ değişimleri, finansman giderleri, inşaat giderleri, sigorta giderleri ve işçilik giderleri yıllık işletme giderleri olarak ele alınmış ve 148.049 € olarak hesaplanmıştır. Atık ısı geliri ve elektrik gelirleri toplamında yıllık gelir 489,723 € olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda yatırımın geri ödeme süresi 2,6 yıl olarak belirtilmiştir.

Kojenerasyonun ilk örnekleri 20. yüzyılın başlarında görülmüştür. Başlangıç gücü santrallerin şehir merkezlerine kurulması ve ısıtma için kullanılması ile olmuştur. Kojenerasyon merkezi ısıtma kullanılan ülkelerde daha önce ve hızlı gelişmiştir. ABD’de sıvı ile ısıtmanın zor olduğu yüksek binalarda basınçlı buhar ile ısıtma yoluna gidilmiştir. İskandinav ülkelerinde iç mekan ısıtmalarının %30-%80’i günümüzde bu yöntem ile ısıtılmaktadır.

2.2 Türkiye’de Kojenerasyon Kullanımının Gelişimi

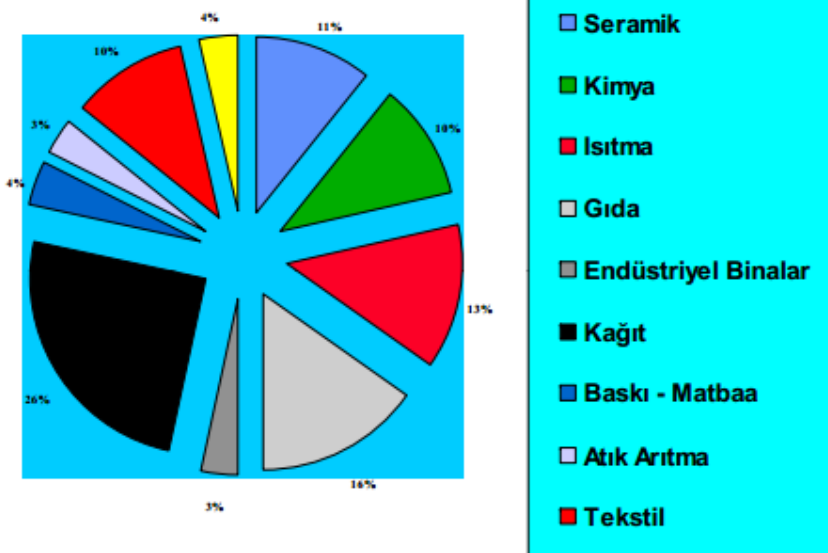
Türkiye’de son 50 yılla kojenerasyon kullanımı gelişmektedir. Enerji üretiminin 1984’te öze sektör tarafından da gerçekleştirilebilmesi ile kendi üretim tesisinin ihtiyacı olan elektriği üreten işletmeler artış göstermiştir (“Tarihsel Gelişim”, 7.3.2013). Türkiye’de kojenerasyon uygulamalarının gelişimi Şekil 2.2 gösterilmiştir.



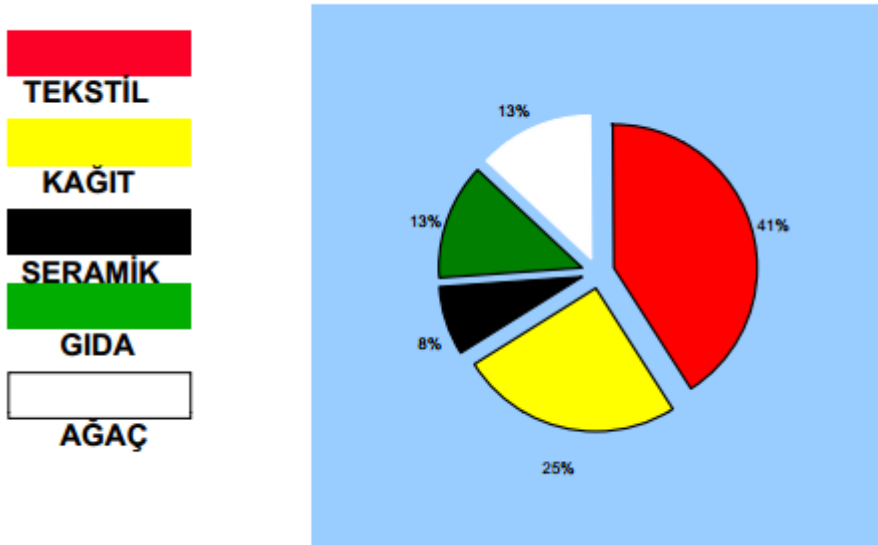
Şekil 2.2: Türkiye kojenerasyon tesisleri kapasite gelişimi.

Kojenerasyon sistemlerinde genel olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Yanma özelliği, çevreye verdiği zararın düşük olması ve depolama maliyeti yaratmaması sebebiyle öncelikli olarak tercih edilmektedir. Propan ile çalışan sistemler mevcuttur. Propan doğal gaza oranla daha düşük bir verimle yanmaktadır. Sıvı yakıtlar içerisinde en az zararlı emisyon salınımına sebep olan ve en yüksek verimle yanan dizeldir. Ancak teknik olarak mümkün olmasıyla birlikte dizel kullanım maliyeti sebebiyle olurlu bir yakıt değildir. Bir diğer sıvı alternatif olarak da fuel oil değerlendirilmektedir. Zaman zaman üretim fazlası verebildiği için devlet tarafından teşvik edilmektedir. Ancak atık maliyeti dolayısıyla tesis karını azaltmaktadır (“Kojenerasyon Nedir,”05.03.2013)

Kojenerasyon öncelikli olarak ısıtma ve soğutma ihtiyacı yüksek evsel alanlar için kullanılabilir. Günümüzde artan siteleşme sürecinde ortaya çıkan büyük yerleşim alanlarının ısınma-soğutma ihtiyaçları ve elektrik talepleri kojenerasyon ile karşılanabilmektedir. Danimarka başta olmak üzere Avrupa ülkelerinde kojenerasyonun yerleşim alanı enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılması yaygındır. Kojenerasyonun Avrupa’da sektörlere göre kullanım oranları Şekil 2.3’de belirtilmiştir. Şekil 2.4’de ise Türkiye’deki oranlar yer almaktadır.



Şekil 2.3: Avrupa'da kojenerasyon uygulamalarının sektörlere göre dağılımı
Tekstil, kağıt, petrokimya, ağaç işleme tesisleri, gıda üretim tesisleri, seramik tesisleri kojenerasyonun yaygın olarak kullanıldığı sektörlerdir.



Şekil 2.4: Türkiye'de kojenerasyon uygulamalarının sektörlere göre dağılımı.
Türkiye Kojenerasyon ve Temiz Enerji Teknolojileri Derneği'nden alınan verilere göre geleneksel yöntemlere oranla kojenerasyon kullanımı ile sağlanan enerji tasarrufunun sektörlere göre dağılımı Çizelge 2.1'deki gibidir.

Çizelge 2.1 Kojenerasyon ile sağlanan enerji tasarrufunun sektörlere göre dağılımı.

Sektör	Enerji Tasarrufu
Demir-Çelik Metal Ana Sanayii	35%
Demir-Çelik Dışı Metal Ana Sanayii	35%
Kimya-Petrol, Kauçuk ve Petrol Ürünleri Sanayii	25%
Dokuma, Giyim ve Deri Sanayii	25%
Kağıt, Kağıt Ürünleri ve Basım Sanayii	25%
Gıda Sanayii	20%
Taş ve Toprağa Dayalı Sanayi	20%
Metal Eşya ve Makine - Teçhizat Sanayii	10%

Kojenerasyon sisteminin faydaları aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Kojenerasyon sistemleri kendi enerjisini üreten bağımsız sistemlerdir.
- Yüksek verimde çalışması sebebiyle enerji kaynaklarında tasarruf sağlamaktadır.
- Merkezi santrallere göre kurulum süresi kısadır, dolayısıyla hızlı elektrik arzı sağlamaktadır.
- Yatırım geri dönüş süresi kısadır.
- Isı enerjisinin taşınımı sırasında enerji kaybı yüksektir. Kojenerasyon sisteminin enerji talebinin olduğu bölgeye kurulabilmesi enerji kaybını azaltmaktadır.
- Oluşturulacak kojenerasyon sisteminin boyunu işletme boyutuna göre belirlenebilmektedir. Dolayısıyla küçük çaplı işletmeler için de kurulum imkanı sağlamaktadır.
- Çevreye atılan atık madde miktarı yalnızca elektrik ya da yalnızca buhar üreten sistemlere oranla düşüktür.
- Kaliteli ve sürekli ve istenen zamanda istenen miktarda enerji üretimi mümkündür. Bütünleşik bir sistem olması sebebiyle enerji verimini geleneksel yöntemlere göre arttırmaktadır.
- Şirket içi enerji kesintisi kaynaklı kayıpların önüne geçilmektedir.

- Hem endüstriyel hem de evsel enerji taleplerinin karşılanmasında kullanılabilir.
- Ulusal enerji maliyetinde azalma sağlamaktadır.

2.3 Enerji Üretiminde Dengeleme

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür çalışmasında kojenerasyon sistemlerinde kullanılan enerji denge modelleri incelenmiştir. Çalışmalar kullanılan modellere ve sektörlere göre analiz edilmiştir.

Brown D. ve diğ. (2005) çalışmalarında kağıt sektörü için kojenerasyon uygulamasında en iyi üretim koşullarını tespiti amaçlamışlardır. En iyileme modelinde karma tamsayılı doğrusal programlama yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarını ekzotermik koşullar üzerinde yoğunlaşmışlar ve sonuç olarak buhar enjeksiyonu ile ısı dönüştürücüleri karşılaştıracak ortamı elde etmişlerdir.

“Yenilikçi küçük ölçekli bir kojenerasyon sisteminin ekserjetik analizi” isimli çalışmada (Badami & Mura, 2010) doğalgaz ile çalışan CHP sisteminin analizi amaçlanmıştır. Üretim tesisinin bileşenlerinin ekserjetik tersinilmezlik koşullarının ve miktarlarının simülasyon yöntemi ile saptanması hedeflenmiştir. Duyarlılık analizi ile sistemin performans kriterleri ortaya konmuştur.

Ashok S. (2007), çalışmasında kırsal kesim için toplam işletme maliyetlerini minimize edecek, farklı yenilenebilir kaynak kullanımlarını en iyileyecek genelgeçer bir model oluşturmayı hedeflemiştir. Çalışmada Hindistan’ın 600 nüfuslu bir çiftçi köyünün enerji kullanımları dikkate alınmıştır.

Babu C.A. ve Ashok S. (2009) çalışmalarında yenilenebilir kaynakların kullanımı ile enerji maliyetini en küçükleyecek ve enerji talebinin tepe noktasını azaltacak doğrusal olmayan modeli kurgulamışlardır. 22 farklı sektördeki incelemeleri sonucu, bağımsız üreticilerin yenilenebilir kaynak kullanımlarının en iyi noktayı sağladığını ortaya koymuşlardır.

“Elektrolitik Süreç Sanayiinde Tepe Enerji Yükünün Yönetimi” aslı çalışmada (Babu & Ashok, 2008), enerji talebinin yüksek olduğu kimya sektöründeki enerji ihtiyacının ve maliyetinin dengelenmesi hedeflenmiştir. İş-enerji yükünün çizelgelenmesi için doğrusal olmayan karma tamsayılı programlamadan

faýdalanılmış, modelin zorluğu nedeniyle dal-sınır metodundan faydalanılmıştır. Enerji piyasasının farklı tarifeleri dikkate alınmıştır.

“İnceleme: Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji uygulamalarında kullanılan en iyileme metotları (Baños et al., 2011) isimli çalışmada, yakın zamanda yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının planlama ve kontrolü için oluşturulan optimizasyon algoritmaları incelenmiştir. Bu çalışmalara doğrusal/ doğrusal olmayan programlama ve sezgisel yaklaşımlar dahil edilmiştir. Çalışma sonucunda geleneksel doğrusal programlama ile geliştirilen modellerin ağırlıkta olduğu ortaya konmuştur. Sezgisel yaklaşımların ve Pareto tabanlı çok amaçlı en iyileme alanlarında çalışmaların geliştirilmesine ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Bergaentzle ve diğ. (2014) çalışmalarında enerji modelleri için talebe dayalı yönetim yaklaşımlarını araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda taleplerin belirlenirken enerji etkinliğini ve çevresel etkinliği en büyükleyecek modeli ortaya koymayı hedeflemişlerdir. Çalışmaları dahilinde talebe dayalı yönetim için kullanılan araçları incelemişlerdir.

Henning ve diğ. (2006) çalışmalarında İsveç’in Linköping beldesinin enerji ihtiyacı ve üretimini belirten dengelenmesini hedeflemişlerdir. Enerji üretimindeki düşümlerdeki başlangıç ve sonuç enerji değerlerini (ısı kaybı vb.) dikkate alarak maliyetini en küçükleyecek modeli oluşturmuşlardır.

İsveç sanayii enerji tüketimi incelendiğinde enerji korunum fırsatlarının değerlendirilmesi ile yıllık tüketimin 20 TWh’dan 13 TWh’a kadar düşürülebileceği ortaya konmuştur. Bu kazanımın sanayide enerji dönüşümlerinden kaynaklı kaybı önleyecek araçların kullanımı, aydınlatma düzeyinin yeniden düzenlenmesi gibi uygulamalar ile gerçekleştirilebilecektir. Henning ve diğ. (2008) çalışmasında MODEST modeli ile İsveç enerji üretimi ile tüketiminin optimizasyonu hedeflenmiştir. Model sonuçlarına göre ısı ihtiyacının kojenerasyon ile karşılanması halinde 300 GWh’lik elektrik açığa çıkacaktır.

“Metanol prosesinde doğrusal olmayan programlama ile gaz türbininin en iyilenmesi” (Kralj & Glavič, 2007) isimli çalışmada kojenerasyon ile eş zamanlı elektrik ve ısı üretiminin doğrusal olmayan programlama ile modellenmesi hedeflenmiştir. Model sonucunda eş zamanlı ısı ve elektrik optimizasyonu ile yıllık 1.7 milyon Euro kazanç sağlanabileceğini ortaya konulmuştur.

Lee ve Chang (2007) çalışmalarında enerji tüketimin ekonomik büyüme üzerindeki doğrusal ve doğrusal olmayan etkilerini incelemeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada doğrusal ve doğrusal olmayan kestirim yöntemlerinden faydalanmışlardır. Çalışma sonucunda enerji büyümesinin doğrusal olmayan etkilerinin enerji-büyüme eğrinin açıklanmasında yeni karakteristikler ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Çalışma Tayvan enerji tüketimi ve yasal koşullarında incelenmiştir. Hükümetlerin enerji politikalarının endüstriyel süreçlerde daha etkin enerji kullanımını teşvik ederek enerji tüketimini, dolayısıyla da sera gazı salınımları kontrol edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Metrolar için havalandırmada geleneksel yöntemler kullanılmakta ve bu yöntemlerin enerji maliyetleri dikkate alınmamaktadır. Liu ve diğ. (2013) metrolardaki hava kalitesini garanti ederken enerji tüketimini en küçükleyecek çok amaçlı en iyileme modeli üzerine çalışmışlardır. Modelin girdileri olarak fanların hızı, trenlerin çizelgesi ve dış havanın yoğunluğunu dikkate almışlardır. Sonuçlara iç mekan hava kalitesini ve enerji tasarrufunu dengeleyen modeli ortaya koymuşlardır. Bu modele göre, havalandırmanın elle kontrolüne oranla enerji tüketiminde %24'e varan iyileştirme sağlamak mümkündür.

“Bölgesel enerji fiyatları ile enerji portföyü en iyilemesi ve risk yönetimi” isimli çalışmada (Lorca & Prina, 2014), elektrik piyasasındaki üreticiler için enerji portföyü modeli oluşturulmuştur. Modelde değişen elektrik fiyatlarının beklenen kazanç ve riski önemli derecede etkilemektedir.

Birçok sanayileşmiş ülkede, gün içerisindeki enerji fiyatları kademelendirilmektedir. Moon ve diğ. (2013) çalışmalarında paralel makine çizelgeleme problemini enerji etkinliği ile birlikte çözmeyi hedeflemektedir. Oluşturulan model üretim süresinin ve zaman bağımlı enerji maliyetinin en küçüklenmesini hedeflemektedir. Bu iki amaç farklı ağırlıklarla ele alınmaktadır. Problemin çözümü için melez genetik algoritma kullanılmıştır.

Enerji piyasasındaki değişimler, üreticileri diğer üreticiler ile bütünleşmiş üretim planları oluşturmaya sevk etmektedir. Üreticilerin rekabetçi piyasada var olabilmesi için planlamalarına enerji portföylerini dahil etmeleri gerekmektedir. Nishi ve diğ. (2012) çalışmalarında, birden fazla üretici için enerji portföylerini ve üretim planlarını birlikte yapacak dağıtık en iyileme yaklaşımını ortaya koymaktadır.

Üreticiler arası bilgi paylaşımının kısıtlı seviyede olacağı kabul edilmektedir. Modelde birden fazla fabrikada üretilen, tek tip enerji gerektiren tek bir ürün üretildiği varsayılmaktadır. Enerji maliyeti miktarına ve ihtiyaç duyulan zamana göre değişmektedir.

Enerji kullanımı yüksek olan sektörler için enerji arzının devamlılığı ve güvenilirliği kritik önem taşımaktadır. Olanrewaju ve Jimoh (2014) çalışmalarında geçmiş enerji modellerini incelemişlerdir. Geliştirilen modellerdeki eksikleri tespit ederek, sanayide enerji etkinliğini değerlendirecek bütünleşik bir model ortaya koymayı hedeflemişlerdir. Bu çalışma kapsamında kısa ve orta vadede enerji tüketiminin kestirimi için yapay sinir ağlarının kullanılabilmesi ortaya konmuştur.

Yakın dönemde geliştirilen enerji modelleri uzun dönem enerji fiyatları ve enerji arzı güvenilirliğini hedef almaktadır. Karar verme süreçlerindeki belirsizlik geleceğe yönelik fiyat ve talebin tespit edilememesinden kaynaklanmaktadır. Enerji pazarının uzun dönemli yapısı kapasiteyi belirleyen yatırımlardan oluşmaktadır. Bu nedenle Olsina ve diğ. (2006) arz tabanlı, doğrusal olmayan ve geçek pazardaki değişimleri kapsayabilecek bir model geliştirmişlerdir.

Sabo ve diğ. (2011) çalışmalarında saatlik doğal gaz tüketiminin kestirimini yapmayı hedeflemişlerdir. Kestirim modelini oluştururken geçmiş dönemlere ait saatlik sıcaklık değişimlerini ve doğalgaz tüketimlerini baz almışlardır. En küçük kareler modelini uygularken Hırvatistan'ın Osijek kentinin geçmiş verilerini kullanmışlardır. İnceledikleri modellerde en uygulanabilir yapının geçmiş doğalgaz kullanımları ile sıcak bilgilisinin ayrı ayrı değerlendirildiğinde elde edildiğini saptamışlardır.

Çimento üretiminde maliyetin yaklaşık %60'ını enerji maliyetleri oluşturmaktadır. Toplam enerji giderinin ise %18'i elektrik enerjisidir. Swanepoel ve diğ. (2014) enerji tüketimini azaltmak ve maliyeti en küçükmek için mevcut sistemleri entegre eden, en iyileyen, kontrol eden ve gelecek enerji maliyetlerini kestiren bir model oluşturmuşlardır. Oluşturulan model sonucunda enerji maliyetlerinden % 7 kazanç sağlamak mümkün olmaktadır.

2.4 Kojenerasyon Kullanan Sektörler

Kojenerasyon teknolojisi farklı sektörlerde kullanılabilir. Yapılan yazın taraması ile bu sektörler tespit edilmiştir.

Ülkelerin enerji tüketimi yıllık ortalama %2 artış göstermektedir, dolayısıyla enerjinin tasarrufunun gelişmekte olan ülkeler için önemi artış göstermektedir. Enerji tasarrufu hem kullanım hem de üretim aşamasında sağlanabilmektedir. Üreticiler için enerji dönüşümü ve tüketimi karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Andreassi ve diğ. (2009) çalışmalarında üretim tesisleri için güç sistemlerini en iyi yönetim ve kontrol stratejisini ortaya koymayı hedeflemişlerdir. İlaç sektöründeki örnekleme aracılığı ile kojenerasyon sisteminin ayar noktalarının belirlenmesi ile enerji tasarrufunun sağlanacağı model sonucu olarak ortaya konmuştur.

“Hastane kompleksi trijenerasyon uygulaması en uygun tasarımı için bir karma tamsayılı programlama modeli” isimli çalışmada (Arcuri, Florio, & Fragiaco, 2007) bir hastane kompleksinin saatlik yük diyagramlarından, en uygun tasarımını ve çalışma koşullarını belirleyen model oluşturulmuştur. Çıktı olarak yönetim maliyetini en küçükleyecek teknoloji ve tesis boyutu belirlenmiştir.

Mevcut koşullarda enerji dönüşümü sırasında yüksek enerji kaybı söz konusudur. Birden fazla enerji tipine ihtiyaç duyulan sistemlerde kojenerasyon sistemleri bu kaybı azaltmaktadır. Arosio ve diğ. (2011) çalışmalarında üretim tesisini “kara kutu” olarak tanımlayarak sisteme giren ve çıkan enerji dengesini en iyileyecek modeli oluşturmuşlardır.

Bracco ve diğ. (2013) çalışmalarında, kentsel alanda binaların ısı ağının oluşturulması ve kurulumu yapılması gereken türbin sayısının belirlenmesi için kullanılacak modeli ortaya koymuşlardır. Modelde hem yatırım ve operasyon maliyetlerini hem de CO2 emisyonlarını minimize eden bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur.

Trijenerasyon tesislerinin tasarımında ve operasyonların planlanmasında en iyilenmesi, girdi ve çıktı karakteristiklerinin fazlalığı nedeniyle karmaşık problemler oluşturmaktadır. Cardona ve Piacentino'nun çalışmasında (2007) bina içi uygulamalarda termodinamik potansiyel dikkate alınarak en iyileme yapılmıştır. Model değişen fiyatlandırma tarifelerine göre farklı senaryoların incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Havaalanları geniş alanlar, ısıtma ekipmanları ve iklimlendirme tesisatı ile yüksek enerji gideri olan sahalardır. Trijenerasyon sistemleri farklı enerji tiplerine arzı sağlamaktadır. Cardona ve diğ. (2006) çalışmalarında havaalanlarının CHCP sistemlerinin geçerliliğini incelemiştir. Çalışma sonucunda, CHCP'nin enerji

kaybını en küçükleyerek havaalanlarının enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında olurluluğu ortaya konmuştur. Araştırmanın devamı niteliğindeki çalışmada (E. Cardona et al., 2006) Malpensa 2000 CHCP tesisinin operasyonları için en uygun stratejinin belirlenmesini hedef almışlardır. Kar odaklı doğrusal programlama ile tesisin çalışma koşulları simüle edilmiştir. (Ennio Cardona, Piacentino, & Cardona, 2006)

Kojenerasyon ve trijenerasyonun kentsel kullanımında ısı ve elektrik dengesinin sağlanması, sistemin tasarımı sırasındaki önemli problemlerden biridir. Cardona ve diğ. (2006) çalışmalarında trijenerasyon ve ısı pompasından oluşan hibrit bir sistemin tasarımsal optimizasyonunu ele almışlardır. Bu sistemi ekonomik ve enerjisel/çevresel faktörler olmak üzere iki farklı açıdan incelemiştir.

Dünyada değişen çevre koşulları göz önünde bulundurulduğunda, enerji üretim sistemlerinin tasarımı ve kurulumu sürecinde çevresel faktörlerin incelenmesi zorunludur. “Çevresel kısıtlar dikkate alınarak trijenerasyon sistemlerinin en iyi birleşimi” isimli çalışmada (Carvalho, Serra, & Lozano, 2011) yaşam döngüsü analizi ve karma tam sayılı doğrusal programlama yöntemi ile çevresel bilgiler elde edilmiştir. Kazan, soğutma külleri, ısı dağıtıcı gibi farklı ekipmanların kurulumu alternatifleri çevresel kriterlere etkilerine göre incelenmiştir. Sonuç olarak kojenerasyon sisteminde çevresel etiklerin kullanılan doğalgaz bileşimi ile doğrudan alakalı olduğu belirtilmiştir.

Trijenerasyon ile elektrik, ısı ve soğutmanın eş zamanlı sağlanması enerji verimliliğinin sağlanması için en etkili yöntemlerden biridir. Chicco ve Mancarella çalışmalarında (2009) sistem bileşenleri arası ve sistem dışı faktörlerle etkileşimleri dikkate alan modeli oluşturmuşlardır. Kapsamlı modeli oluştururken matris yaklaşımını kullanmışlardır. Modellerini bir hastaneye ait yaz, kış ve bahar verileri ile çalıştırmışlardır. Model çıktısı olarak enerjinin verimli kullanımı ile saatlik operasyonel enerji maliyetini diğer kontrol stratejilerine göre azalttıklarını ortaya koymuşlardır.

Geleneksel yöntemler yakıttaki potansiyel enerjinin yaklaşık %30'unu elektrik enerjisine dönüştürebilirler. CHCP sistemleri enerji verimliliğini arttırırken aynı zamanda hava kirliliğinin azalmasına imkan sağlamaktadır. Cho ve diğ. çalışmasında (2009) CHCP sistemlerinin operasyonları iklim koşulları dikkate alınarak en

iyilenmektedir. En iyileme modelinde hem ekonomik faktörler hem de enerji kullanımları ve CO² salınımları dikkate alınmaktadır. Enerji tüketiminin hangi amaç fonksiyonuna göre ideal seviyede olacağı şehir modellerine göre değişmektedir. San Francisco kenti örneğinde şehrin enerji kullanımını en küçükleyen bakış açısının maliyet minimizasyonu ile elde edildiği belirtilmiştir. Columbus, Miami ve Minneapolis kentlerinde ise CO² emisyonu minimizasyonu etkili olmaktadır.

“Hastane yapılarında CHP içeriğinin değerlendirilmesinde karma tam sayılı doğrusal programlama” isimli çalışmada (Costa & Fichera, 2014) kamusal alanlarda CHP operasyonlarının çizelgelenmesi için en uygun modelin oluşturulması hedeflenmiştir. Oluşturulan model yıllık operasyon zamanı ve kurulum aşamasında boyutların belirlenmesi olmak üzere iki farklı amaç fonksiyonu ile incelenmiştir. İki amaç fonksiyonunun en iyilenmesi ile ortalama 300 hastalı bir hastane için yıllık %20’ye varan iyileştirme sağlanabileceği belirtilmiştir.

Elhanan ve Derbentli çalışmalarında (2007) kojenerasyon sistemlerinin ekonomik ve termodinamik incelemesini yapmayı hedeflemişlerdir. Model sonucunda maliyetlerin gerçek hayat değerleri ile kıyasla azalacağını göstermiştir. Sistem yakıt enerjisinin %70’inden faydalanmayı sağlamaktadır. Bütünleşik sistemin yerine geleneksel yöntemlerin kullanılması halinde bu oran %40 daha düşük olacaktır.

Facci ve diğ. (2014) kompleks trijenerasyon sistemlerinin kontrolü için en uygun yöntemin bulunması üzerine çalışmışlardır. Bu kapsamda, türbinlerin bir günlük çalışma noktalarını saatlik enerji maliyeti, bakım maliyeti, açma-kapama maliyeti ve sistem bileşenlerini incelemişlerdir.

Freschi ve diğ. (2013) çalışması trijenerasyon kurulumlarının faydalarını operasyon maliyetleri ve sera gazı salınımları üzerinden değerlendirmişlerdir. Gıda endüstrisinde yaptıkları çalışmada ekonomik ve çevresel en iyileme amaçlarının çelişebildiğini ifade etmişlerdir.

Ghaebi ve diğ. çalışmasında (2012) trijenerasyon sistemlerinin enerji dengesinin en iyileme modeli üzerine çalışılmıştır. Çalışma sonucunda %15’e varan maliyet iyileştirmesinin mümkün olabileceği belirtilmiştir.

Trijenerasyon ve kojenerasyon sistemleri kurulumu ile elde edilecek faydalar, yüksek ölçüde sistemlerin tasarımı ve operasyonel stratejisine bağlıdır. Jing ve diğ. (2012)

yaptıkları çalışmada farklı operasyonel stratejiye ait çalışma sistemlerini değerlendirmişlerdir.

“Bir trijenerasyon tesisinin çok amaçlı en iyilenmesi” isimli çalışmada (Kavvadias & Maroulis, 2010) trijenerasyon tesislerinin tasarımı için en iyileme yöntemi geliştirilmiştir. Model kapsamına teknik, ekonomik, enerjetik ve çevresel etkenler dahil edilmiştir.

“Mevcut gaz türbinleri ile CCHP sistemi enerji optimizasyonu modeli” çalışmasında (Kong, Wang, & Huang, 2005) gaz türbini, soğutucu ve buhar kazanından oluşan sistemin optimal çalışma strateji üzerine çalışılmıştır. Doğrusal programlama ile toplam maliyetin en küçüklenmesi hedeflenmiştir.

Birden fazla enerji tipinin eş zamanlı üretildiği kojenerasyon sistemlerinin, ticari anlamda yaygınlaşabilmesi için enerji yönetimi ve operasyonel stratejilerin gelişmesine ihtiyaç vardır. Kong ve diğ. ısıtma, soğutma ve elektrik üretiminden oluşan CCHP tesislerinde enerji yönetimi ve operasyonların en iyilenmesini araştırmışlardır (Kong, Wang, Li, & Huang, 2009). Oluşturdukları modelin amacı satın alınan hem elektrik hem de yakıtın (doğal gaz) en küçüklenmesidir. Sistem enerji yükü ihtiyacı ve enerji maliyetleri ile ilişkilendirilmiştir. Modele göre elektrik-gaz maliyet oranı düştükçe sistemlerin kullanımı ekonomik açıdan olurlu olmamaktadır. Elektrik-gaz maliyet oranı 0.19’un altına düştüğünde türbin kullanımı olurlu olmazken, bu oran 4’ün üzerine çıktığında enerji fiyatından bağımsız hale gelmektedir.

Yakıt kaynaklarının tükenmesi Dünya’nın önemli enerji probleminin kaynağını oluşturmaktadır. Dünya çapındaki petrol rezervi 2006 yılı için 1293 milyar varil olarak belirtilirken, günlük tüketim miktarı 80 milyon varili aşmaktadır (P. Liu, Gerogiorgis, & Pistikopoulos, 2007). Artan sera etkisi de dikkate alındığında yakıtların yüksek verimlilikle kullanımı ve salınımların en alt seviyeye çekilmesi zorunludur. Polijenerasyon sistemleri enerji üretimi ile yapay yakıt üretiminin eş zamanlı yapıldığı sistemlerdir. Lui ve diğ. çalışmalarında polijenerasyon sistemlerinin geliştirilmesindeki stratejik kararlar için model oluşturmayı hedeflemişlerdir.

Lozano ve diğ. (2010) trijenerasyon sistemlerinin ilk tasarımı için bir model ortaya koymuşlardır. Bu modelin 5000 binalık bir alanının enerji ihtiyacını modellemesi

beklenmektedir. Modelde kurulacak teknolojinin saptanması hedeflenmiştir. Model şebekeden alınacak ve şebekeye satılacak enerji için geçerli olan yasal kısıtlar dahil edilmiştir. Mevcut sistem yerine trijenerasyonun uygulanması halinde 4 yıl içerisinde geri ödeme maliyetinin karşılanacağı hesaplanmıştır.

Mago ve Hueffed geniş ofis binalarının termal ve elektriksel enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında trijenerasyon kullanımını enerji ihtiyacı, operasyonel maliyetleri ve CO2 emisyonlarını dikkate alarak modellemiştir (Mago & Hueffed, 2010). Çalışmada elektrik talebi, ısı talebi ve mevsimsel stratejiler olmak üzere 3 farklı operasyonel strateji üzerine yoğunlaşmıştır. Ekonomik kazançların elverdiği sınırlarda karbondioksit salınımının en azlanması hedeflenmiştir. Model çıktısı olarak operasyonel maliyetlerin %2.6 oranından azaltılabileceği belirtilmiştir.

Benelmir ve Feidt'in çalışmalarında (1998) ekserji kuralları kısıt alınarak maliyetin analizi hedef alınmıştır. Örnek olarak Fransa'da yer alınan 3 farklı tesis seçilmiştir. Model çıktısı olarak yalnızca geri ödeme süresinin değil, yatırım ve operasyon maliyetlerinin de iyileştirilebileceği belirtilmiştir.

“Dönemlik kar maksimizasyonu için endüstriyel kojenerasyon sistemlerinin kısa dönem çizelgelenmesi” isimli çalışmada (Tina & Passarello, 2012) kojenerasyon sisteminin haftalık ve saatlik olarak optimizasyonu hedeflenmiştir. Teknik, ekonomik ve yasal kısıtlar göz önüne alınmıştır. Geliştirilen model için İtalya'daki bir yağ rafinerisi kojenerasyon sistemi örnek vaka olarak ele alınmıştır. Çalışma büyük endüstriyel alanlarda kojenerasyon sisteminin kısa dönem saatlik optimizasyonunu hedeflemiştir. %2'den daha fazla toplam yakıt maliyetinden kazanç sağlanmıştır. Çalışmanın sonraki aşamasında kısa ve orta dönem elektrik fiyat tahminleri kullanılabilir.

“Kağıt ve kağıt hamuru üretimi kojenerasyon sisteminde enerji optimizasyonu” çalışması (Marshman, Chmelyk, Sidhu, Gopaluni, & Dumont, 2010) kağıt ve kağıt hamuru üreticilerinin karının artırılması fikri ile ortaya çıkmıştır. Kojenerasyon seçilmesinin nedeni ise buharın hem elektrik üretimi hem de kağıdın kurutulmasında kullanılmasıdır. Model 24 saatlik planlama döneminde saatlik periyotlar bazında çalıştırılmıştır. Orta uzunluktaki planlama döneminde ise haftalık (168 saatlik) planlama söz konusudur. Kısa dönem ve uzun dönem planlamalarda elektrik satış

fiyatı sabit kabul edilmiştir. Modelin farklı koşullarda %10 ile %50 arasında fayda sağlayacağı gözlenmiştir.

Oh ve diğ. (2007) karma tamsayı programlama ile kojenerasyon sisteminin modellenmesi ele almıştır. Çalışma Güney Kore'de eşzamanlı olarak ısı ve elektrik üreten kojenerasyon sistemlerinin ticari ve evsel alanlarda kullanımının enerji verimi sebebiyle artışından yola çıkılarak hazırlanmıştır. Oluşturulan model farklı yerleşim alanlarının taleplerine göre denemiştir. Çalışmada sonuç olarak elde edilen optimal çözümün etkinliğinin talep yapısına göre değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Kojenerasyon sistemleri hem ısı hem de elektrik ihtiyacı olan işletmeler için en iyi çözümlerden biridir. Ahmedi ve diğ. (2012) çalışmasında İran'da bulunan ve kağıt üretiminde buhar kullanılan bir fabrika ele alınmıştır. Çalışma dahilinde, kojenerasyon sisteminin termodinamik modellenmesi; kullanılabilir enerjinin, toplam maliyetin, tesisin CO² emisyonunun dikkate alınması; genetik algoritmanın optimizasyon için kullanılması ile optimal çözümün aranması hedeflenmiştir. Sonuçlara göre sistemin farklı talep değerlerinde kullanılan yakıt ve elde edilen enerji bazında optimal çalışma noktaları belirlenmiştir.

Wakui ve diğ. (2014) kojenerasyon sistemlerinin operasyonel kararlarının en iyileştirilmesi için bir model oluşturmuşlardır. Model kojenerasyon ünitesi arası enerji geçiş transferlerini ve kayıplarını içermektedir. Çalışmanın amacı bağlantı noktalarını ve sıcak su muhafazasını kısıt alarak enerji kaybının en küçüklenmesidir.

Cali ve diğ. güç, kullanılan ısı, alan sıcaklıkları gibi bağımsız değişkenleri kullanarak yakıt kullanım oranı, hava kullanım oranı, hava sıcaklığı bağımlı değişkenlerinin kestirimini yapacakları model üzerine çalışmışlardır (2007). Elde edilen regresyon çıktılarına göre, üretilen elektrik ve ısı miktarını en büyüleyecek optimizasyon modelini oluşturmuşlardır.

Gu ve diğ. kojenerasyon sistemlerinin modellenmesi, planlanması ve enerji yönetimi üzerine kapsamlı bir inceleme yapmışlardır (2014). Kojenerasyon sistemlerinin teknik, ekonomik, çevresel karakterleri sistemin tasarımı ve enerji yönetimine bağlıdır. Sistemlerde gerçek zamanlı kontrol mekanizmaları, gün öncesi planlama yapısı güvenilir bir yapı oluşturmanın önemli basamaklarıdır.

Carpaneto ve diğ. çalışmalarında (2007) çeşitli belirsizlik koşullarını dikkate alarak kojenerasyon uygulamasına genel bir bakış sağlamaya çalışmışlardır. Amaç, uygun

çözümün bulanması, operasyonel kararların alınması konularında kar vericiye yön göstermektedir.

Vietnam kağıt sanayiinde kojenerasyon potansiyeli” isimli çalışmada (Bhattacharyya & Thuy Hien, 2005) mevcut 6 kağıt fabrikası ve açılması planlanan 9 yeni kağıt fabrikası dikkate alınarak odaklanılmış ve ekonomik analizi yapılmıştır. Doğal gaz, kömür gibi farklı yakıt türleri dikkate alınarak incelemeler yapılmıştır. Çalışmanın çıktısı olarak, şebekeye enerji satışı olmaması halinde bile, kağıt sanayii için kojenerasyonun ekonomik avantaj sağladığı belirtilmiştir.

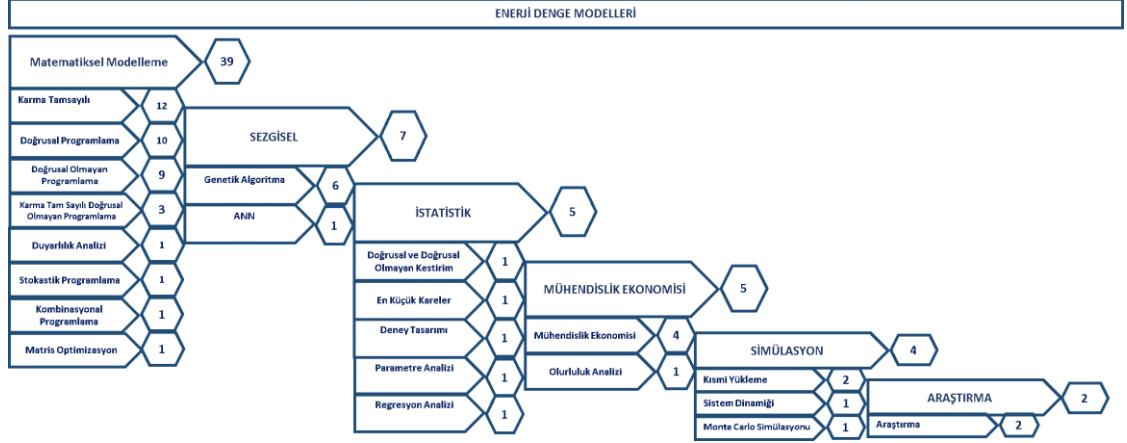
Çalışmada güneş paneli, termal ısı ünitesi ve kojenerasyondan oluşan kombine sistemin en iyilenmesinin hedeflendiği çalışmada (Obara, 2007) operasyon maliyeti, arz –talep dengesindeki hatalar ve sera gazı salınımının en küçüklenmesi hedeflenmiştir.

Sanayide kojenerasyon kullanımının teşviki için Ukrayna ilginç bir örnek olabilir. Çernobil faciasının ardından, enerji arzı Ukrayna’da önem arz eden bir problem haline gelmiştir. Ukrayna enerji ihtiyacının %60’ı sanayi kullanımından kaynaklandığı için, hükümet alternatif yöntem arayışına gitmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda aksiyon planının önemli bir bölümünün kojenerasyon uygulamalarının yaygınlaştırılarak, enerji verimliliğinin artırılması olacağını belirtmişlerdir (Somasundaram & Parker, 1999).

Witzani ve Pechtl’in çalışmalarında (Witzani & Pechtl, 1996), belirlenen taleplere göre tesis planının yüksek performansla elde edileceği planlama aracının tasarımını hedeflemişlerdir. Ekonomik analizleri, toplam yakıt tüketimi ve verimliliği baz almaktadır. Talepler farklı zaman aralıklarına göre (günlük, saatlik vb.) gruplanarak dikkate alınmıştır. Modelde yük dengeleri, yakıt-enerji fiyat dengesi kısıt olarak alınmıştır.

Ambalaj kağıdı üretiminde enerji yönetiminin stratejik benzetimi” isimli çalışmada (Cakembergh-Mas, Paris, & Trépanier, 2010) sistemin buhar ihtiyacı, kojenerasyon altyapısı, ısıtma ağı konuları dikkate alınarak ambalaj kağıdı üretimi incelenmiştir. Elektrik ve yakıt fiyatları, sistemin enerji talebi, enerji üretim kapasitesi, yakıt kapasitesi, teknik ve yasal kısıtlar dikkate alınmıştır. Oluşturulan model sonucunda buhar kazanları kullanım miktarı, elektrik üretim miktarı, satılacak elektrik ve buhar miktarları belirlenebilmektedir.

Şekil 2.5'te geçmiş çalışmalarda kullanılan yöntemlerin, Şekil 2.6'da ise bu çalışmalarda dikkate alınan sektörlerin dağılımları yer almaktadır.

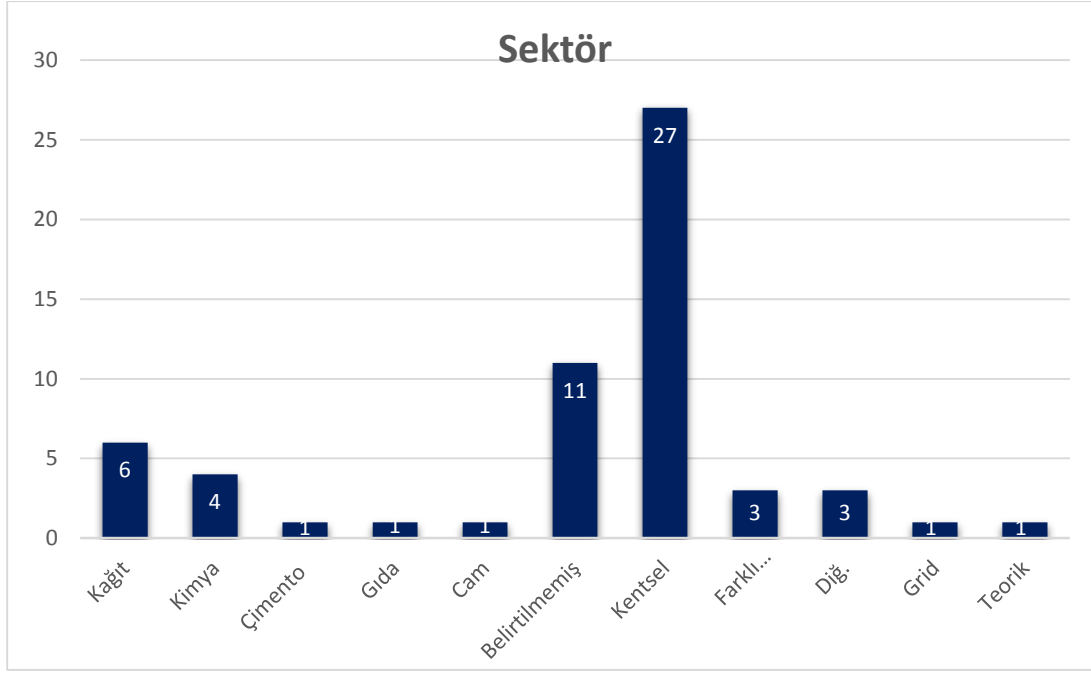


Şekil 2.5: Denge Modelleri-Çalışma Sayısı.

Ferreira ve diğ. çalışmasında (2010) içme suyu üretiminde tuzdan arındırma ile entegre kojenerasyon tesisi incelenmiştir. Oluşturulan modelde hem termodinamik hem de ekonomik kısıtlar dikkate alınmıştır.

Mancarella çalışmasında (2009) kojenerasyon ve elektrikli ısı pompasından oluşan bir sistemin termodinamik yasalarına dayalı modelini oluşturmayı hedeflemiştir. Çalışmada enerji-değişim tanımı, kojenerasyon sisteminin verimliliğini artırması için ısı pompası ile elektriğin ısıya dönüşümünü için kullanılmıştır. Isı pompası kullanılarak kojenerasyon sonrası elde edilen elektriğin de ısıya dönüştürüldüğü yapıyı, eşdeğer enerji tesisi olarak tanımlamışlardır.

Aguilar ve diğ. (2011) çalışmalarında bir kojenerasyon tesissindeki potansiyel enerji kayıplarının önlenmesi, karbondioksit salınımların azaltılması ve kazancın artırılması konularını incelemiştir. Sisteme termodinamik, ekonomik ve yasal kısıtları dahil etmişlerdir. Benzetim sonucunda kazancın %60'a kadar artırılabilirliğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.6: Sektör-Çalışma Sayısı Dağılımı.

2.5 Gün Öncesi Fiyatlama

İncelenen denge modellerinde, gün öncesi fiyatları girdi olarak kullanılabilir. Gün önce fiyatlandırma kriterleri ülkelerin enerji piyasası dinamiklerine göre belirlenebilmektedir.

2001 yılında çıkarılan 4628 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu sonrasında elektrik piyasası, taraflar arasında anlaşmalarla belirlenmektedir. Elektrik fiyatı arz ve talebin dengesine göre belirlenmektedir (Kolmek, 2012)

14 Nisan 2009 tarihli 27200 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan, Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği’ne göre, elektrik arz ve talebini dengede tutmak için gerçekleştirilen faaliyetler “dengeleme” olarak tanımlanmıştır. Dengelemeye katılabilecek üretim ve/veya tüketim tesisleri (tamamı ya da bir bölümü olmak üzere) dengeleme birimi olarak tanımlanmıştır. Yönetmelikte geçen önemli terimlerimler aşağıdaki gibidir (“Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği,” 2009)

- Gün öncesi dengeleme: Sistemdeki arz ve talebin ve/veya piyasa katılımcılarının sözleşme taahhütleri ile üretim ve/veya tüketim planlarının gün

öncesinden dengelemesi amacıyla gerçekleştirilen gün öncesi planlama ya da gün öncesi piyasasına ilişkin faaliyetleri ifade eder.

- Gün öncesi fiyatı: Gün öncesi planlama kapsamında belirlenen sistem marjinal fiyatlarını ya da gün öncesi piyasasında belirlenen nihai piyasa takas fiyatlarını ifade eder.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, üretim maliyetini en küçükleyecek karma tam sayılı programlama modeli oluşturulacaktır. Karma tam sayılı doğrusal programlama, karar değişkenlerinin bir kısmı tamsayı iken bir kısmının rasyonel sayı olduğu programlama modelleridir. Karma tam sayılı modellerin genel yapısına bir örnek aşağıdaki gibi verilebilir (Wakui et al., 2014) :

$$\text{Min}Z: x_1 + x_2 + x_3 \quad (3.1)$$

$$\text{Öyle ki; } n \cdot x_1 + m \cdot x_2 + l \cdot x_3 \leq k \quad (3.2)$$

$$x_1 > 0, x_1 \text{ tamsayı}, x_2 \in \{0,1\}$$

Karma tam sayılı doğrusal modeller, tam sayılı modelleme yöntemleri ile çözülmektedir. Bu yöntemler sezgisel yöntemler ve en iyileme yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

Sezgisel yöntemler, özelleşmiş problem tipleri için geliştirmiş, en olurlu sonuca vermeyen ancak olurlu sonuca yaklaşan yöntemlerdir. Bu yöntemler problemin çözüm optimal çözümü aramak için harcanacak zaman ve enerjiyi miktarı çok fazla olduğunda tercih edilmektedir.

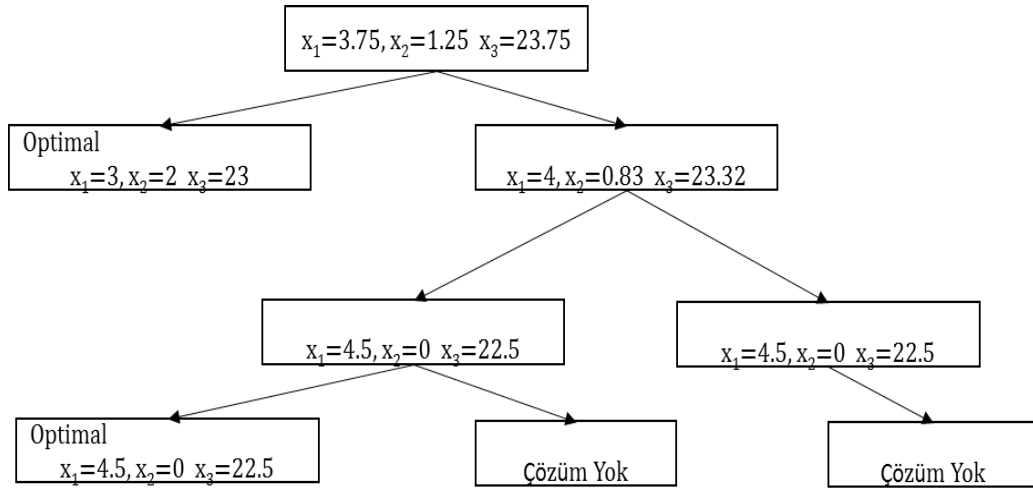
Tam sayılı modellerin çözümleri için farklı algoritma yaklaşımları mevcuttur. Karma tam sayılı modeller, tam sayılı modellerin çözüm yaklaşımları ile çözülmektedir. Bu yaklaşımlar aşağıdaki gibi gruplanabilir (Winston, 2003):

- Dal-sınır yöntemi
- Kesme düzlemi yöntemi

Tam sayılı modellerin çözümünde en sık kullanılan yöntem olan dal – sınır algoritmasında öncelikle model tam sayılı olma koşunu göz ardı edilerek ele alınır. Bu şekilde elde edilen çözüme doğrusal programlama gevşetmesi denir (Floudas, 1995). En büyükleme problemleri için; doğrusal programlama gevşetmesi ile elde edilen sonuç, tam sayılı programlama ile elde edilenden daha büyük ya da bu değere eşit (doğrusal modelin en iyi sonucu veren karar

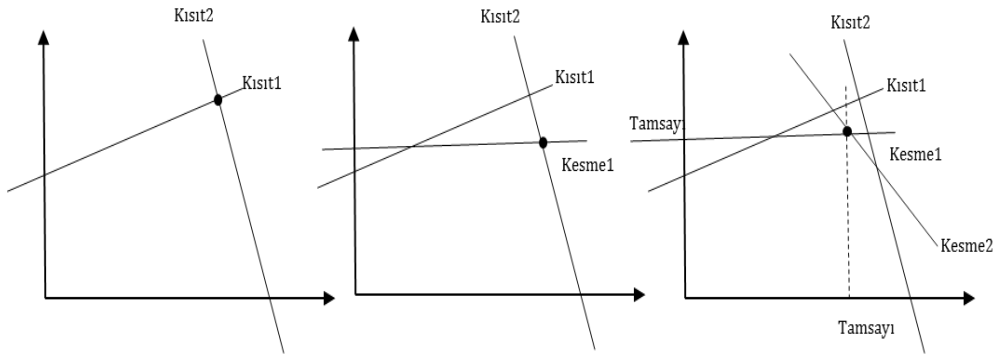
değişkenleri tam sayılı ise) olacaktır. En küçükleme problemleri için ise, elde edilen sonuç tam sayılı modelleme sonucundan daha küçük (ya da eşit) olacaktır.

Çözüm için tam sayı olması istenen değişkenlerden biri seçilir. Bu karar değişkenine ait değer ile ilgili yeni kısıtlar eklenir. Yani $x_1 = 3,5$ iken sistem en iyi değerini alıyorsa, modele $x_1 \leq 3$ ve $x_1 \geq 4$ kısıtları modele eklenir. x_1 'in tamsayı değerine ulaştığı noktada diğer değişkenler için tamsayı değerleri aranmaya başlanır. Konu ile Winston'ın (2003) verdiği örnek Şekil 3.1'de verilmiştir.



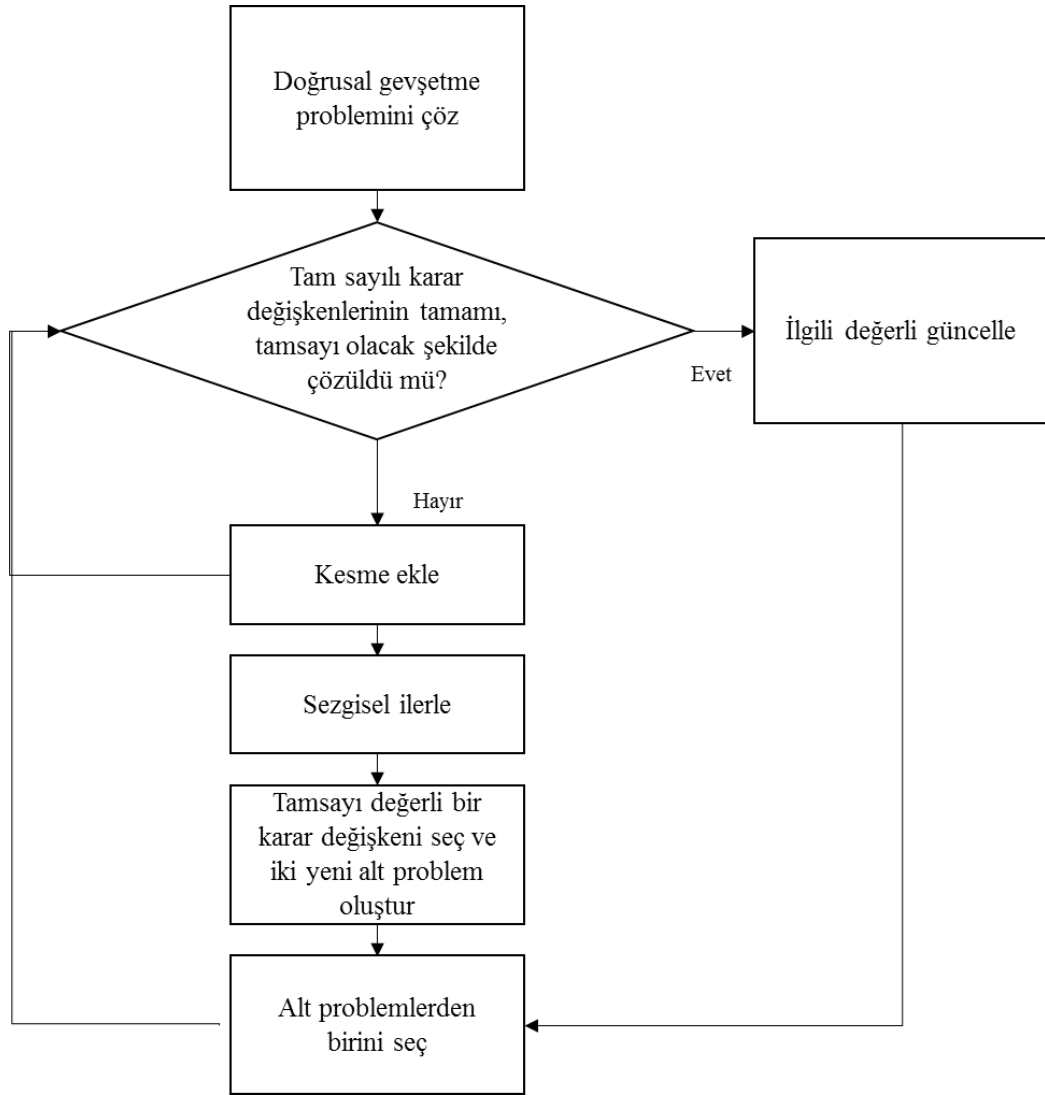
Şekil 3.1. Dal Sınır Algoritması Örneği.

Kesme düzlemi algoritması, dal – sınır algoritması gibi doğrusal bir çözüm bularak başlar. (Winston, 2003). Algoritmanın ilerleyen adımlarında, elde edilen çözüm uzayını daraltacak kısıtlar eklenir. Eklenen kesmelerin, olası tamsayı çözümlerini elememesi gerekmektedir (Winston, 2003). Şekil 3.2’de, kesme düzlemi algoritmasının genel yapısı görselleştirilmiştir. Kesmeler model için yeni kısıtlar oluşturmaktadır.



Şekil 3.2. Kesme Düzlemi Algoritması.

Genel yaklaşım olan dal-sınır algoritması büyük ölçekli problemlerin çözülmesi için uygun değildir. Karar değişkeni sayısı arttıkça, çözüme ulaşmak için tekrarlanması gereken yineleme sayısı artmaktadır. GUROBI ve CPLEX gibi çözücülerde, dal sınır algoritması ve kesme düzlemi algoritmalarının birlikte kullanıldığı dal-kesme (branch and cut) algoritmaları kullanılır (Taha, 2003). Şekil 3.3’de dal-kesme algoritmasının genel yapısı verilmiştir.



Şekil 3.3. Dal- Kesme Algoritması Yapısı.

MIP modelleri yap/yapma gibi sonlu sayıda kararların bulunduğu bir çok alanda kullanılmaktadır. Bütçe planlama, ağ planlama, kapasite planlama gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında kojenerasyon sistemlerinin planlanmasında kullanılan yöntemler detaylı yöntemler detaylı olarak incelenmiştir. Çizelge 3.1. Literatür Taraması.

No	KAYNAK		AMAÇ			ANA GÜÇ BİRİMİ				
	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H	D	K
15	Nishi T. Ve diğ. (2012)	Distributed Optimization of Energy Portfolio and Production Planning for Multiple Companies Under Resource Constraints		X					Btm	
16	Olanrewaju O & Jimoh A. (2014)	Review of energy models to the development of an efficient industrial energy model			X				Btm	X
17	Olsina F. Ve diğ. (2006)	Modeling long-term dynamics of electricity markets		X		X				
17	Olsina F. Ve diğ. (2006)	Modeling long-term dynamics of electricity markets		X		X				
18	Sabo K. Ve diğ. (2011)	Mathematical models of natural gas consumption			X	X				X
19	Swanepoel J. ve diğ. (2014)	Integrated energy optimisation for the cement industry: A case study perspective		X		X				
20	Ukil A.& Siti W. (2008)	Feeder load balancing using fuzzy logic and combinatorial optimization-based implementation								
21	Tina G.&Passarello G. (2012)	Short-term scheduling of industrial cogeneration systems for annual revenue maximisation		X		X				
22	Marshman D. ve diğ. (2010)	Energy optimization in a pulp and paper mill cogeneration facility		X		X				
23	Oh ve diğ. (2007)	Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system		X		X				X
24	Ahmadi ve diğ. (2012)	Multi-objective optimization of a combined heat and power (CHP) system for heating purpose in a paper mill using evolutionary algorithm		X		X				
25	Andreassi L. ve diğ. (2009)	Innovative method for energy management: Modelling and optimal operation of energy systems	X			X				
26	Arcuri G. Ve diğ. (2007)	A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex		X		X				X

Çizelge 3.2. Literatür Taraması (Devamı).

No	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H	D	K
27	Arosio S. ve diğ. (2011)	A model for micro-trigeneration systems based on linear optimization and the Italian tariff policy	X			X				
28	Bracco S. (2013)	Economic and environmental optimization model for the design and the operation of a combined heat and power distributed generation system in an urban area		X	X	X				X
29	Cardona E. & Piacentino A. (2007)	Optimal design of CHCP plants in the civil sector by thermoeconomics	X			X				X
30	Cardona E. Ve diğ. (2006)	Energy saving in airports by trigeneration. Part I: Assessing economic and technical potential	X			X				X
31	Cardona E. Ve diğ. (2006)	Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant		X		X				X
32	Cardona E. Ve diğ. (2006)	Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems	X	X	X	X				X
33	Carvalho M. Ve diğ. (2011)	Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints			X	X				X
34	Chicco G. & Mancarella P. (2009)	Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization	X			X				X

35	Cho H. ve diğ. (2009)	Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme	X			X		
36	Costa A. & Fichera A. (2014)	A mixed-integer linear programming (MILP) model for the evaluation of CHP system in the context of hospital structures		X		X		
37	Elhanan A. & Derbetli T. (2007)	Gaz türbinli kojenerasyonla elektrik üretimi ve soğutma	X			X		
38	Facci A. Ve diğ. (2014)	Optimization of CHCP (combined heat power and cooling) systems operation strategy using dynamic programming		X		X		
39	Freschi F. Ve diğ. (2013)	Economic and environmental analysis of a trigeneration system for food-industry: A case study		X	X	X		

Çizelge 3.3. Literatür Taraması (Devamı).

No	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H	D	K
40	Ghaebi H. Ve diğ. (2012)	Exergoeconomic optimization of a trigeneration system for heating, cooling and power production purpose based on TRR method and using evolutionary algorithm	X			X				
41	Jing ve diğ. (2012)	Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of BCHP system based on life cycle assessment	X			X				X
42	Kavvadias K. & Maroulis Z. (2010)	Multi-objective optimization of a trigeneration plant	X	X	X	X				X
43	Kong X. ve diğ. (2005)	Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines		X		X				
44	Kong X. ve diğ. (2009)	Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine		X		X				X
45	Liu ve diğ. (2007)	Modeling and optimization of polygeneration energy systems		X				X		
46	Lozano ve diğ. (2010)	Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints		X		X				X
47	Pedro J. Mago, Anna K. Hueffed	Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies		X		X				X
48	Riad Benelmir, Michel Feidt	Enerhy cogeneration systems and energy management strategy	X	X		X				X
49	Tetsuya Wakui, Takahiro Kinoshita, Ryohei Yokoyama	A mixed-integer linear programming approach for cogeneration- based residential energy supply networks with power and heat interchanges	X			X				X
50	Cali M. Ve diğ. (2010)	Design of experiments for fitting regression models on the tubularSOFC CHP100kWe: Screening test, response surface analysis and optimization	X			X				

Çizelge 3.4. Literatür Taraması (Devamı).

No	KAYNAK		AMAÇ			ANA GÜÇ BİRİMİ		
	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H
51	Gua W. Ve diğ. (2014)	Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review	X	X				
52	Carpaneto E. Ve diğ. (2007)	A Decision Theory Approach to Cogeneration Planning in the Presence of Uncertainties		X		X		
53	Bhattacharyya S. & Hien N. (2005)	Cogeneration potential in pulp and paper industry of Vietnam		X		X		
54	Obara S. (2007)	Dynamic operation plan of a combined fuel cell cogeneration, solar module, and geo-thermal heat pump system using Genetic Algorithm		X	X			X
55	Somasundaram S. Ve diğ. (1999)	Ukraine: Emerging Market For Industrial Energy Efficiency Opportunities		X				
56	Witzani M.&Pecht P. (1996)	Modeling of (Cogeneration) Power Plants on Time-Dependent Power Demands of the Consumer		X		X		
57	Cakembergh-Mas A. Ve diğ. (2010)	Strategic simulation of the energy management in a Kraft mill		X		X		
58	Ferreira E. ve diğ. (2010)	Optimization analysis of dual-purpose systems		X				X
59	Mancarella P. (2009)	Cogeneration systems with electric heat pumps: Energy-shifting properties and equivalent plant modelling	X			X		
60	Aguilar F. ve diğ. (2011)	Prediction of performance, energy savings and increase in profitability of two gas turbine steam generator cogeneration plant, based on experimental data	X	X	X	X		

E:Ekserjetik Ek:Ekonomik Ç:Çevresel F:Fosil Y:Yenilenebilir H:Hibrit K:Kentsel BF:Birden fazla S:Sektör

Çizelge 3.5’de incelenen çalışmalarının detaylarına yer verilmiştir.

No	KAYNAK		AMAÇ			ANA GÜÇ BİRİMİ				Sektör			Dengeleme Modeli
	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H	D	K	BF	Sektör	
1	Brown D. ve diğ. (2005)	A dual representation for targeting process retrofit, application to a pulp and paper process	X			X						Kağıt	Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
2	Badami & Mura (2010)	Exergetic analysis of an innovative small scale combined cycle cogeneration system	X			X						Btm	Kısmi Yükleme Duyarlılık Analizi
3	Ashok D. (2007)	Optimised model for community-based hybrid energy system		X				X	X	X			Doğrusal Programlama
4	Babu & Ashok (2009)	Optimal utilization of renewable energy-based IPPs for industrial load management		X			X				X		Doğrusal Olmayan Programlama
5	Babu & Ashok (2008)	Peak Load Management in Electrolytic Process Industries		X		X						Kimya	Karma Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama
6	Banos R. Ve diğ. (2011)	Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review			X		X				X		Araştırma
7	Bergaentzlé c ve diğ. (2014)	Demand-side management and European environmental and energy goals: An optimal complementary approach			X	X				X			Doğrusal Programlama
8	Henning ve diğ. (2006)	Modelling and optimisation of electricity, steam and district heating production for a local Swedish utility	X					X	X	X			Doğrusal Programlama
9	Henning D. & Trygg L. (2008)	Reduction of electricity use in Swedish industry and its impact on national power supply and European CO2 emissions			X	X					X		Doğrusal Programlama
10	Anita Kovac Kralj, Peter Glavic	Optimization of a gas turbine in the methanol process, using the NLP model		X		X						Kimya	Doğrusal Olmayan Programlama
11	Lee C. & chang C. (2007)	The impact of energy consumption on economic growth: Evidence from linear and nonlinear models in Taiwan	X			X				X			Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Kestirim
13	Lorca a. & Prina J. (2014)	Power portfolio optimization considering locational electricity prices and risk management		X			X					D	Stokastik Programlama
14	Moon J. Ve diğ. (2013)	Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency		X						Btm		D	Genetik Algoritma

Çizelge 3.1. Literatür Taraması.

No	KAYNAK		AMAÇ			ANA GÜÇ BİRİMİ				Sektör			Dengeleme Modeli
	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H	D	K	BF	Sektör	
15	Nishi T. Ve diğ. (2012)	Distributed Optimization of Energy Portfolio and Production Planning for Multiple Companies Under Resource Constraints		X					Btm			D	Karma Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama
16	Olanrewaju O & Jimoh A. (2014)	Review of energy models to the development of an efficient industrial energy model			X				Btm	X			Yapay Sinir Ağları
17	Olsina F. Ve diğ. (2006)	Modeling long-term dynamics of electricity markets		X		X						Grid	Sistem Dinamiği
17	Olsina F. Ve diğ. (2006)	Modeling long-term dynamics of electricity markets		X		X						Grid	Doğrusal Olmayan Programlama
18	Sabo K. Ve diğ. (2011)	Mathematical models of natural gas consumption			X	X				X			En Küçük Kareler
19	Swanepoel J. ve diğ. (2014)	Integrated energy optimisation for the cement industry: A case study perspective		X		X						Çimento (Kimya)	Doğrusal Olmayan Programlama
20	Ukil A.& Siti W. (2008)	Feeder load balancing using fuzzy logic and combinatorial optimization-based implementation											Kombinatoriyal Optimizasyon
21	Tina G.&Passarello G. (2012)	Short-term scheduling of industrial cogeneration systems for annual revenue maximisation		X		X						Kağıt	Doğrusal Olmayan Programlama
22	Marshman D. ve diğ. (2010)	Energy optimization in a pulp and paper mill cogeneration facility		X		X						Kağıt	Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
23	Oh ve diğ. (2007)	Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system		X		X				X			Genetik Algoritma
24	Ahmadi ve diğ. (2012)	Multi-objective optimization of a combined heat and power (CHP) system for heating purpose in a paper mill using evolutionary algorithm		X		X						Kağıt	Genetik Algoritma
25	Andreassi L. ve diğ. (2009)	Innovative method for energy management: Modelling and optimal operation of energy systems	X			X						Kimya	Doğrusal Olmayan Programlama
26	Arcuri G. Ve diğ. (2007)	A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex		X		X				X			Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama

Çizelge 3.2. Literatür Taraması (Devamı).

No	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H	D	K	BF	Sektör	Dengeleme Modeli
27	Arosio S. ve diğ. (2011)	A model for micro-trigeneration systems based on linear optimization and the Italian tariff policy	X			X						Btm	Doğrusal Programlama
28	Bracco S. (2013)	Economic and environmental optimization model for the design and the operation of a combined heat and power distributed generation system in an urban area		X	X	X				X			Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
29	Cardona E. & Piacentino A. (2007)	Optimal design of CHCP plants in the civil sector by thermoeconomics	X			X				X			Doğrusal Olmayan Programlama
30	Cardona E. Ve diğ. (2006)	Energy saving in airports by trigeneration. Part I: Assessing economic and technical potential	X			X				X			Olurluluk Analizi
31	Cardona E. Ve diğ. (2006)	Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant		X		X				X			Doğrusal Programlama
32	Cardona E. Ve diğ. (2006)	Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems	X	X	X	X				X			Doğrusal Olmayan Programlama
33	Carvalho M. Ve diğ. (2011)	Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints			X	X				X			Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
34	Chicco G. & Mancarella P. (2009)	Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization	X			X				X			Matris Optimizasyon
35	Cho H. ve diğ. (2009)	Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme	X			X				X			Doğrusal Programlama
36	Costa A. & Fichera A. (2014)	A mixed-integer linear programming (MILP) model for the evaluation of CHP system in the context of hospital structures		X		X				X			Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
37	Elhanan A. & Derbetli T. (2007)	Gaz türbinli kojenerasyonla elektrik üretimi ve soğutma	X			X				X			Doğrusal Programlama
38	Facci A. Ve diğ. (2014)	Optimization of CHCP (combined heat power and cooling) systems operation strategy using dynamic programming		X		X						Btm	Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
39	Freschi F. Ve diğ. (2013)	Economic and environmental analysis of a trigeneration system for food-industry: A case study		X	X	X						Food	Karma Tam Sayılı Doğrusal P.

Çizelge 3.3. Literatür Taraması (Devamı).

No	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H	D	K	BF	Sektör	
40	Ghaebi H. Ve diğ. (2012)	Exergoeconomic optimization of a trigeneration system for heating, cooling and power production purpose based on TRR method and using evolutionary algorithm	X			X						Btm	Genetik Algoritma
41	Jing ve diğ. (2012)	Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of B CHP system based on life cycle assessment	X			X				X			Mühendislik Ekonomisi
42	Kavvadias K. & Maroulis Z. (2010)	Multi-objective optimization of a trigeneration plant	X	X	X	X				X			Genetik Algoritma
43	Kong X. ve diğ. (2005)	Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines		X		X						Btm	Doğrusal Programlama
44	Kong X. ve diğ. (2009)	Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine		X		X				X			Doğrusal Olmayan Programlama
45	Liu ve diğ. (2007)	Modeling and optimization of polygeneration energy systems		X				X				Btm	Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
46	Lozano ve diğ. (2010)	Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints		X		X				X			Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
47	Pedro J. Mago, Anna K. Hueffed	Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies		X		X				X			Doğrusal Programlama
48	Riad Benelmir, Michel Feidt	Enerhy cogeneration systems and energy management strategy	X	X		X				X			Mühendislik Ekonomisi
49	Tetsuya Wakui, Takahiro Kinoshita, Ryohei Yokoyama	A mixed-integer linear programming approach for cogeneration- based residential energy supply networks with power and heat interchanges	X			X				X			Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
50	Cali M. Ve diğ. (2010)	Design of experiments for fitting regression models on the tubularSOFC CHP100kWe: Screening test, response surface analysis and optimization	X			X						Btm	Deney Tasarımı

Çizelge 3.4. Literatür Taraması (Devamı).

No	KAYNAK		AMAÇ			ANA GÜÇ BİRİMİ				Sektör			Dengeleme Modeli
	Yazar	Kaynak	E	Ek	Ç	F	Y	H	D	K	BF	Sektör	
51	Gua W. Ve diğ. (2014)	Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review	X	X					Btm			Btm	Araştırma
52	Carpaneto E. Ve diğ. (2007)	A Decision Theory Approach to Cogeneration Planning in the Presence of Uncertainties		X		X				X			Monte Carlo Simülasyonu
53	Bhattacharyya S. & Hien N. (2005)	Cogeneration potential in pulp and paper industry of Vietnam		X		X						Kağıt	Mühendislik Ekonomisi
54	Obara S. (2007)	Dynamic operation plan of a combined fuel cell cogeneration, solar module, and geo-thermal heat pump system using Genetic Algorithm		X	X			X				Btm	Genetik Algoritma
55	Somasundaram S. Ve diğ. (1999)	Ukraine: Emerging Market For Industrial Energy Efficiency Opportunities		X					Btm			Kimya & Cam	Mühendislik Ekonomisi
56	Witzani M.&Pecht P. (1996)	Modeling of (Cogeneration) Power Plants on Time-Dependent Power Demands of the Consumer		X		X							Kısmi Yükleme
57	Cakembergh-Mas A. Ve diğ. (2010)	Strategic simulation of the energy management in a Kraft mill		X		X						Kağıt	Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
58	Ferreira E. ve diğ. (2010)	Optimization analysis of dual-purpose systems		X				X				Kimya	Karma Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama
59	Mancarella P. (2009)	Cogeneration systems with electric heat pumps: Energy-shifting properties and equivalent plant modelling	X			X							Parametre Analizi
60	Aguilar F. ve diğ. (2011)	Prediction of performance, energy savings and increase in profitability of two gas turbine steam generator cogeneration plant, based on experimental data	X	X	X	X							Regresyon Analizi

E:Ekserjetik Ek:Ekonomik Ç:Çevresel F:Fosil Y:Yenilenebilir H:Hibrit K:Kentsel BF:Birden fazla S:Sektör Btm: Belirtilmemiş D:Diğer

Çizelge 3.5. Literatür Taraması.

4. MATEMATİKSEL MODEL

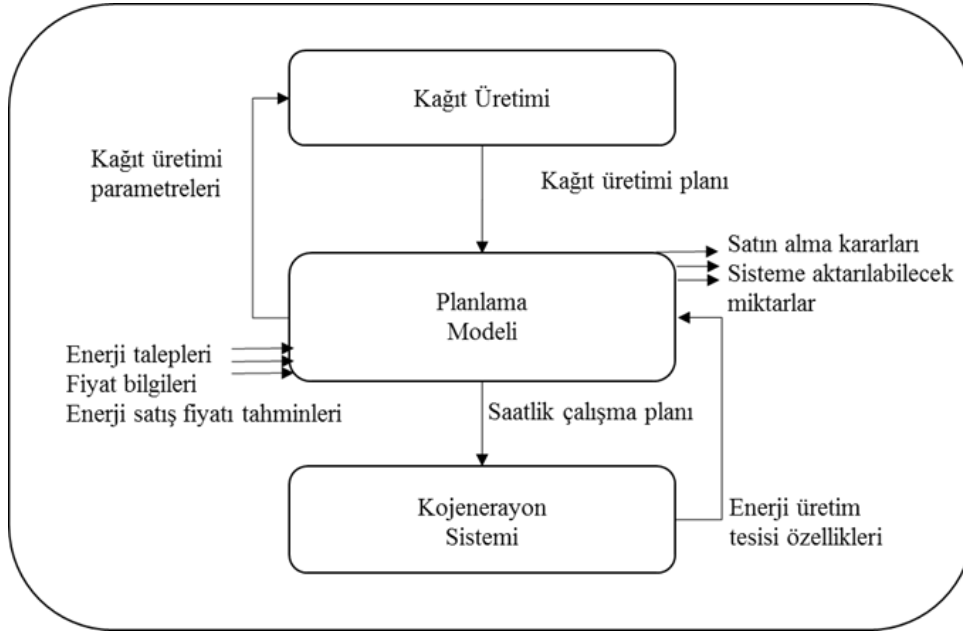
Literatürdeki kojenerasyon - trijenerasyon modelleme çalışmaları incelendiğinde üç farklı odak noktasına rastlanılmaktadır. Bunlar ekonomik, ekserjetik ve çevresel bakış açılarıdır. Bu bakış açılarına göre kurgulanan sistemlerde dikkate alınan kısıtlar farklılaşmaktadır.

Ekonomik amaç fonksiyonlu modellerde talep, yakıt fiyatı, enerji piyasası koşulları, fiziksel koşullar ve kapasite bilgileri kısıt olarak alınmaktadır.

Çalışma sonucunda maliyeti minimize edecek, enerji üretim-satın alma kararlar ve kağıt üretiminde tercih edilecek süreci belirleyecek bir modelin öne sürülmesi hedeflenmiştir.

Oluşturulacak olan modelin genel yapısı, girdileri ve çıktıları

Şekil 4.1’de belirtilmiştir.



Şekil 4.1. Sistem Tasarımı.

4.1 Karar Değişkenleri ve Parametreler

Oluşturulan modelin bir günlük talep için saatlik bazda üretim kararlarını oluşturulmasını hedeflemektedir. Saatlik enerji ihtiyacı, üretim koşullarını bağlı bir fonsiyon olarak ele alınmıştır.

Çalışma dahilinde kullanılan süreç kavramı hem kojenerasyon sisteminde farklı ayar noktalarını, kağıt üretiminde ise kaynak alternatifleri ve üretim parametrelerini (hız, devir vb.) ifade etmektedir. Enerji tipi olarak ısı, farklı basınçlarda değerlerinde buhar, elektrik ve yakıt dikkate alınmıştır.

4.1.1 İndisler

i : Üretilecek kağıt tipleri, $i \in I, I: \{1, 2, \dots, i^{max}\}$

e : Enerji tipleri, $e \in E, E: \{1, 2, \dots, e^{max}\}$

e' : e tipi enerjinin dönüştürebileceği her bir enerji tipi, $e' \in E'$
 $E': \{1, 2, \dots, e'^{max}\}$

s : Enerji ve kağıt üretim süreçleri, $s \in S, S: \{1, 2, \dots, s^{max}\}$

t : Planlanacak dönem, $t \in T, T: \{0, 1, \dots, 24\}$

k : Enerji üretim kaynakları, $k \in K, K: \{1, 2, \dots, k^{max}\}$

k'_k : k kaynağı ile eş zamanlı çalışmayacak her bir kaynak, $k'_k \in K'_k$

$K'_k: \{1, 2, \dots, k'_k\}$

l : Kağıt Makinesi, $l \in L, L: \{1, 2, \dots, l^{max}\}$

K_l : l kağıt makinesi ile eş zamanlı çalışması gereken kaynaklar kümesi

4.1.2 Parametreler

φ_{se} : s sürecinde e tipi enerjiden elde edilen miktar

γ_s : s sürecinde kullanılan doğalgaz miktarı

$C_{t,e}^p$: t döneminde e enerji tipinin satın alma maliyeti

τ_k : k kaynağı yeniden başlatma maliyeti

π_p : sistem dışından satın alınan elektrik için ceza miktarı

$V_{e,t}$: e tipi enerjinin t dönemindeki birim satış fiyatı

$\omega_{l,t}: \begin{cases} 1, & l \text{ kağıt makinesi } t \text{ döneminde çalışıyor ise} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$

$g_{i,t}: \begin{cases} 1, & i \text{ kağıdı } t \text{ döneminde üretiliyor ise} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$

M: Çok büyük bir sayı

4.1.3 Karar değişkenleri

$$x_{i,t}^s: \begin{cases} 1, & i \text{ kağıdı } t \text{ döneminde } s \text{ süreci ile üretiliyor ise} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$y_{s,t}^k: \begin{cases} 1, & t \text{ zamanında } s \text{ süreci ile } k \text{ kaynağında üretim yapılıyor ise} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$P_{t,e}$: t döneminde sistem dışından temin edilen e tipi enerji miktarı

$$u_{t,k}: \begin{cases} 1, & t \text{ döneminde } k \text{ kaynağı çalışıyorsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$\alpha_{k,t}: \begin{cases} 1, & k \text{ kaynağı } t \text{ dönemi yeniden balışma kuralı yardımcı karar değişkeni} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$d_{t,e}^e$: t döneminde e enerji tipinden e' enerji tipine dönüştürülen miktar

$d_{t,e}^{e'}$: t döneminde e enerji tipine dönüştürülen e' enerji tipi miktar

$$r_{k,t}: \begin{cases} 1, & k \text{ kaynağı } t - 1 \text{ deöneminde çalışmayıp } t \text{ döneminde çalışıyorsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

4.2 Kısıtlar

Modele kağıt gereksinimlerinin karşılanması, enerji ihtiyaçlarının karşılanması ve üretim yapılabilmesi için tesisin fiziksel sınırları kısıt olarak eklenmiştir. Bir kağıdın üretiminde ihtiyaç duyulan enerji tipi ve miktarları, kağıt üretiminde tercih edilen sürece bağlı bir fonksiyon çıktısı olarak ele alınmıştır.

Enerji tipi e'ye t periyodunda i kağıdını s süreci ile üretirken gerek duyulan $(x_{i,t}^s)$, $f^e(x_{i,t}^s)$ fonksiyonu ile belirtilmiştir.

Modele kağıt gereksinimlerinin karşılanması, enerji ihtiyaçlarının karşılanması ve üretim yapılabilmesi için tesisin fiziksel sınırları kısıt olarak eklenmiştir. Bir kağıdın üretiminde ihtiyaç duyulan enerji tipi ve miktarları, kağıt üretiminde tercih edilen sürece bağlı bir fonksiyon çıktısı olarak ele alınmıştır.

Enerji tipi e'ye t periyodunda i kağıdını s süreci ile üretirken gerek duyulan $(x_{i,t}^s)$, $f^e(x_{i,t}^s)$ fonksiyonu ile belirtilmiştir.

t döneminde e enerji tipine duyulan ihtiyaç $(E_{e,t})$ aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{e=1}^E f^e(x_{i,t}^s) = E_{e,t} \quad (4.1)$$

Bir zaman aralığında bir kaynak yalnızca bir üretim süreci için kullanılabilir.

$$\sum_s y_{s,t}^k \leq 1 \quad \forall t > 0, \forall k \quad (4.2)$$

Sistem dahilinde üretilen enerji ile karşılanamayan ihtiyaçların sistem dışından satın alınacağı varsayılmıştır.

$$E_{e,t} - \sum_k^{k^{max}} \sum_s^{s^{max}} y_{s,t}^k \cdot \varphi_{s,e} - d_{t,e}^e = P_{t,e} \quad (4.3)$$

Enerji talebi üç farklı yolla karşılanabilmektedir. Bu yollar sistem içerisinde üretim, sistem dışından satınalma ve üretilen bir enerji tipini diğerine dönüştürmedir.

$$\sum_s^{s^{max}} \sum_k^{k^{max}} \varphi_{s,e} \cdot y_{s,t}^k + \sum_{e'}^{e'^{max}} d_{t,e'}^e - \sum_e^{e^{max}} d_{t,e}^e + P_{t,e} \geq E_{e,t} \quad \forall e, \forall t > 0 \quad (4.4)$$

Kağıt üretim sistemi tasarımı enerji üretim planını etkileyebilmektedir. Isı aktarım kanallarının konumu bir kağıt makinesi ile belirli enerji üretim kaynaklarının eş zamanlı çalışmasını zorunlu kılabilir. Bu nedenle, kağıt üretim planı ile belirlenen, kağıt makinelerinin çalışıp çalışmaması kararı girdi olarak kabul edilmelidir.

$$\sum_s^{s^{max}} y_{s,t}^k + \sum_s^{s^{max}} \sum_{k'}^{k'^{max}} y_{s,t}^{k'} \geq w_l \quad \forall t > 0, \forall k \in K_l \quad (4.5)$$

Kağıt üretimini besleyen bir kanal üzerinden birden fazla tipte enerji üretim kaynağı yer alabilmektedir. Bu kaynaklar arasında eş zamanlı çalışma kısıtları söz konusu olabilir. Bu gibi durumlar için, eğer k kaynağı çalışıyor ise k kaynağı ile aynı kanal üzerinde yer alan K'_k kümesine ait k' kaynaklarının çalışmaması sağlanmalıdır.

$$\sum_s^{s^{max}} y_{s,t}^k + \sum_s^{s^{max}} y_{s,t}^{k'} \leq 1 \quad \forall k, \forall k' \quad (4.6)$$

Kojenerasyon sistemlerinde sistemi başlatmanın belirli bir maliyeti vardır. Bu maliyet kaynağın ömrü-bakım bedeli ilişkisinden ve sistemin başlatılması sırasında enerji üretilmeden yakıt tüketimi yapılan süre dikkate alınarak belirlenmektedir. Model dahilinde birbirini izleyen dönemler arasında çalışma rejiminin tutarlı olması gerekmektedir.

$$\sum_s y_{s,t-1}^k - \sum_s y_{s,t}^k \leq M(1 - \alpha_{k,t}) \quad \forall t > 0, \forall k \quad (4.7)$$

$$r_{k,t} - 1 \leq M\alpha_{k,t} \quad \forall t > 0, \forall k \quad (4.8)$$

Yukarıda belirtilen kısıtlar ile üretim yapılarak, i tipi kağıda ait t dönemindeki taleplerini karşılamak için hangi süreç aracılığı üretim yapılacağı belirlenmelidir.

$$\sum_s x_{i,t}^s = g_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (4.9)$$

4.3 Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonu enerji üretim sistemi dahilindeki aşağıdaki maliyetlerden, elde edilen gelirin çıkarılması ile kalan net maliyetin en küçüklenmesini hedeflemektedir.

- Sistem dışından satın alınan elektrik maliyeti ($C_{t,e} \cdot P_{t,e}$)
- Üretim yapılmasına karar verilen sürecin doğalgaz maliyeti ($\sum_s^{s^{max}} \sum_{t=1}^{t^{max}} \gamma_s \cdot C_{t,e} \cdot y_{s,t}^k$)
- Bir dönem çalışmayan kaynağı bir sonraki dönem çalıştırma maliyeti ($\sum_k^{k^{max}} \sum_t^{t^{max}} \tau_k \cdot r_{k,t}$)
- Sistem ihtiyaçları karşılandıktan sonra sistem dışına satılan enerjiden elde edilen gelir ($-\sum_s^{s^{max}} \sum_t^{t^{max}} V_e \cdot (E_{e,t} - y_{s,t}^k)$)

$$\text{Min } Z = C_{t,e} \cdot P_{t,e} + \sum_s^{s^{max}} \sum_{t=1}^{t^{max}} \gamma_s \cdot C_{t,e} \cdot y_{s,t}^k - \sum_s^{s^{max}} \sum_t^{t^{max}} V_{e,t} \cdot (E_{e,t} - y_{s,t}^k) + \left(\sum_k^{k^{max}} \sum_t^{t^{max}} \tau_k \cdot r_{k,t} \right) \quad (4.10)$$

4.4 Matematiksel Model

Enerji ihtiyaçları, üretim alternatifleri ve fiziksel kısıtlar dikkate alındığında, maliyeti en küçükleyecek model aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\text{Min } Z = C_{t,e} \cdot P_{t,e} + \sum_s^{s^{max}} \sum_{t=1}^{t^{max}} \gamma_s \cdot C_{t,e} \cdot y_{s,t}^k - \sum_s^{s^{max}} \sum_t^{t^{max}} V_{e,t} \cdot (E_{e,t} - y_{s,t}^k) + \left(\sum_k^{k^{max}} \sum_t^{t^{max}} \tau_k \cdot r_{k,t} \right) \quad (4.11)$$

Öyle ki;

$$\sum_s^S y_{s,t}^k \leq 1 \quad \forall t > 0, \forall k \quad (4.12)$$

$$E_{e,t} - \sum_k^{k^{max}} \sum_s^{s^{max}} y_{s,t}^k \cdot \varphi_{s,e} - d_{t,e}^e = P_{t,e} \quad (4.13)$$

$$\sum_s^{s^{max}} \sum_k^{k^{max}} \varphi_{s,e} \cdot y_{s,t}^k + \sum_{e'}^{e'^{max}} d_{t,e'}^e - \sum_e^{e^{max}} d_{t,e}^{e'} + P_{t,e} \geq E_{e,t} \quad \forall e, \forall t > 0 \quad (4.14)$$

$$\sum_s^{s^{max}} y_{s,t}^k + \sum_s^{s^{max}} \sum_{k'}^{k'^{max}} y_{s,t}^{k'} \geq w_l \quad \forall t > 0, \forall k \in K_l \quad (4.15)$$

$$\sum_s^{s^{max}} y_{s,t}^k + \sum_s^{s^{max}} y_{s,t}^{k'} \leq 1 \quad \forall k, \forall k' \quad (4.16)$$

$$\sum_s^S y_{s,t-1}^k - \sum_s^S y_{s,t}^k \leq M(1 - \alpha_{k,t}) \quad \forall t > 0, \forall k \quad (4.17)$$

$$r_{k,t} - 1 \leq M\alpha_{k,t} \quad \forall t > 0, \forall k \quad (4.18)$$

$$\sum_s^S x_{i,t}^s = g_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (4.19)$$

5. UYGULAMA

5.1 Hayat Kimya

Hayat Kimya, Dayanıklı Tüketim Malları sektöründe temizlik ve sağlık ürünleri, ev temizlik ürünleri, bebek bakım ürünleri, kadın hijyen ürünleri, kişisel bakım ürünleri ve temizlik kağıdı ürünlerini üretmektedir. Hayat Enerji işletmesi satın alınan doğal gazın, Hayat Kimya işletmelerinde kullanılmak üzere elektrik ve ısı enerjilerine dönüştürüldüğü bölümdür.

Toplam kapasitesi saatlik 32 MW olan kojenerasyon sistemi kağıt, hijyen ve deterjan fabrikalarının bulunduğu kampüs içerisinde yer almaktadır ve kampüs içerisinde yer alan tesislerin ihtiyaçlarını karşılamayı hedeflemektedir. Kampus ihtiyaçları içerisinde depolama sistemler ve konfor kullanımları da bulunmaktadır.

Hayat Enerji, üretim için gerekli olan enerji, sıcak hava (egzoz gazı) ve buhar ihtiyacını 4 adet kojenerasyon sisteminden sağlamaktadır. Bu 4 tesis sistem farklılıklar gösterse de temelinde birbirinin aynı olan 4 ayrı sistemdir (GT1, GT2, GT3, GT4; GT: Gaz Türbini). Birbirlerinden bağımsız olarak çalışırlar.

1 sm³ gazın ısı değeri ortalama 8250 KJ (kilo jule). Ancak bu değer anlık olarak değişebilir. Gerçek değeri İzgaz belirtir. Kimi zaman gazın ısı değeri 9180 KJ de olabilir.

Kağıt üretimi ile enerji üretimi birlikte değerlendirilen sistemlerdir. Üretilen kağıdın, birim ton başına düşen maliyeti enerji maliyetleri dikkate alınarak hesaplanır. Mevcut durumda enerji sisteminin yönetimi operatör kontrolündedir. Operatör kontrolündeki yönetimde maliyet faktörü dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle kağıt birim ton maliyeti öngörülememektedir.

Üretimden artan elektrik şebekeye satılmaktadır. Bir günlük şebekeye satılacak miktarlar saatlik bazda bir gün öncesi saat 11:00'e kadar bildirilmelidir. Belirtilen miktarlar görüşülen fiyat üzerinden ücretlendirilir. Şebekeye belirtilen miktar kadar enerji sağlanamazsa, şebeke gerekli miktarı farklı bir üreticiden satın alır ve satın

aldığı miktarı fatura eder. Belirtilen miktardan fazla aktarım yapılır ise fazla miktar avantajlı fiyat üzerinden değerlendirilememektedir. Bu nedenle doğalgaz ve öngörülen satış fiyatı üzerinden şebekeye satılabilecek/ satılması karlı olacak güç miktarlarının gün öncesinden tespit edilmesi kritiktir. Böylece kardan zarar ya da cezai işlem riskleri kontrol altına alınmış olacaktır.

Mevcut durumda genel eğilim, saatlik satış fiyat tahminleri dikkate alınmadan sabit rejimle çalışılması yönündedir. Bu durum kardan zarar edilmesine neden olabilirken, kişisel müdahalelerde üretim değiştirildiğine cezai işlemlere de neden olabilmektedir. Aşağıdaki çizelgede ortalama değerler üzerinden yapılan yıllık maliyet değerlendirilmesi yer almaktadır. Ortalama değer olarak 4 türbinin saatlik 5.5 MW elektrik üretimi yapması alınmıştır. Ortalama çalışma süreleri dikkate alınarak elde edilen maliyet hesabı Çizelge 5.1’de yer almaktadır.

Çizelge 5.1: Ortalama Maliyet Hesabı.

Saatlik Enerji Üretim Maliyeti	Günlük Çalışma Saati	Yıllık Ortalama Çalışılan Gün	Toplam Enerji Maliyeti
6688 TL	24 Saat	360 Gün	57,784,320 TL

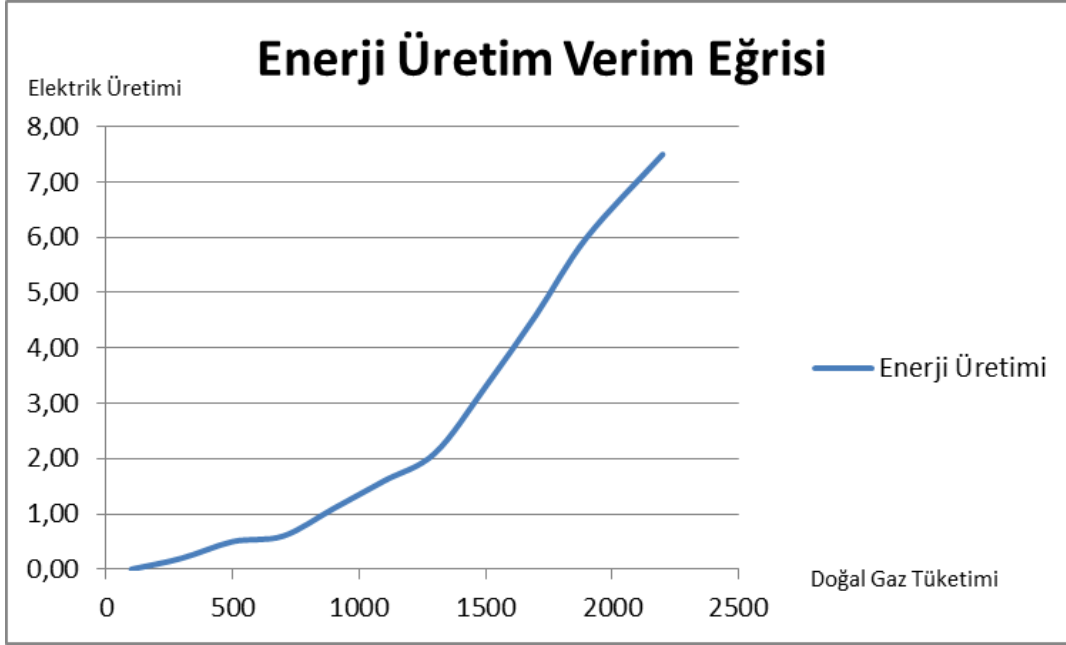
5.2 Enerji Kaynakları

5.2.1 Gaz türbini

Gaz türbinleri kojenerasyon modülünün ana bileşenleridir.

- Dışarıdan hava alınır.
- Basıncı arttırılır.
- Hava ile doğalgaz sıkıştırılır.
- Karışım yakılır ve yüksek basınçlı bir patlama yaşanır.
- Elektrik jeneratörüne bağlı olan türbin döner ve elektrik üretilir.
- Yanmak sonucu oluşan yaklaşık 650 °C egzoz gazı kullanılmak üzere sistemden çıkar.

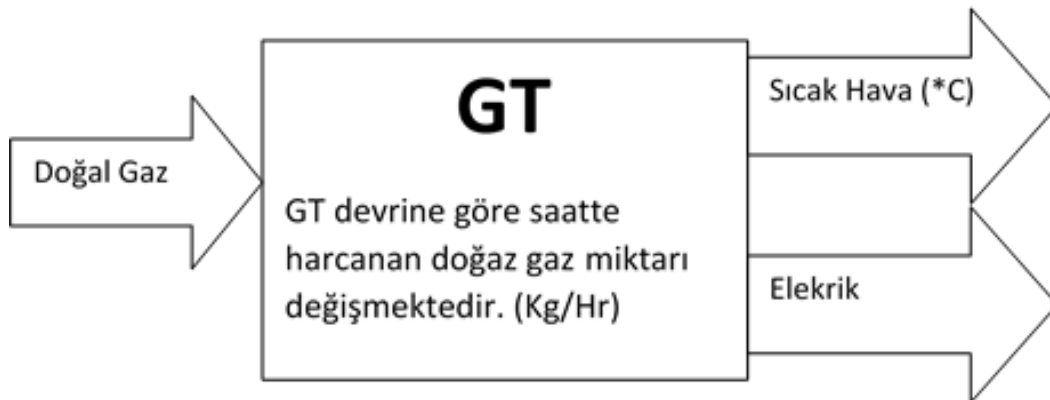
Kojenerasyon sisteminin türbin (elektrik üretim) ünitesi doğrusal bir verim göstermez. Her bir ünite 7.5 MW/h'lik elektrik üretebilir. Ancak yüksek devirlerde sistem daha verimli olurken düşük verimlerde daha bu verim düşer. Şekil 5.1'de türbin verim eğrilerine dair bir örnek verilmiştir.



Şekil 5.1: Örnek Türbin Verim Eğrisi.

Gaz türbinleri (GT) genellikle 6000 KW ve 7500 KW arasında çalışmaktadır. Ancak yaz aylarında saatlik üretim 6800 KW'ı geçememektedir.

Gaz türbini verimi çevresel koşullara göre değişir. Dolayısıyla çevresel koşullar türbin veriminde ana etken değildir. Türbin veriminde ana etken türbinin çalışma devridir. Şekil 5.2 gaz türbini yapısını örneklemektedir.



Şekil 5.2: Gaz Türbini Yapısı.

5.2.2 Brülör

Brülör ünitesi doğalgaz yakarak sıcak hava sağlayan ünitelerdir. Elektrik üretimi yoktur, egzoz gazı ile kurutma yapar.

5.2.3 Buhar kazanı

Kurutma işlemi sonucunda egzoz gazının sıcaklığı yaklaşık 400-450 °C ye düşer. Bu gaz buhar üretimi için buhar kazanlarına iletilir. Her bir kojenerasyon ünitesine bağlı buhar kazanları bulunmaktadır.

16 barlık kazanlardan çıkan buhar bir kolektörde toplanır ve buradan ilgili kağıt makinelerine gider. Kağıt makinelerinde ihtiyaç duyulan buharın basıncı ilgili ürüne bağlı olarak değişebilir. Bu durumda vanalar yardımı ile basınç düşürülür ve ilgili kağıt makinesine bu ayardan sonra aktarılır. 3 bar basınçlı buhar ve 16 bar basınçlı buhar kazanları ayrıdır.

5.2.4 Eko-Chiller

Buhar üretiminden sonra yaklaşık 200 °C’de egzoz gazı kalır. Bu gaz yaz aylarında Chiller’a gönderilir ve konfor amaçlı, soğutma işleminde kullanılır. Kışın ise eko modunda su ısıtma amaçlı kullanılır. Soğutma ihtiyacı kısıt oluşturmadığı için modele dahil edilmeyecektir.

5.2.5 Brülörlü kazan

Doğalgazın yakılması ile buhar elde edilmesini sağlayan sistemdir. Verimliliği yüksektir. Doğalgaz fiyatı – elektrik fiyatı dengesine göre gaz türbini yerine brülörlü kazan kullanmak avantajlı hale gelebilir.

5.3 Üretim Talepleri

Hayat Enerji, Hayat Kimya kampüsü enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kurulmuştur. Tesisin ana müşteri Hayat Kağıt’tır. Kağıt üretim sürecinde, kağıt hazırlamada elektrik, kurutmada ısı enerjisi ihtiyacı yüksektir. Kurutma süresinde egzoz gazıyla ve buhar birlikte kullanılmaktadır.

İhtiyaç duyulan elektrik ve ısı enerjisi üretilen kağıdın türüne, gramajına, makinenin hızına, çalışılan fan devri ve kağıt makinelerinin karakteristiğine göre değişiklik

göstermektedir. Bu nedenle enerji ihtiyaçları bu 4 değişkene göre belirlenen formülle hesaplanmaktadır.

Kimya ve hijyen fabrikalarındaki üretim değerleri ortalama değerler gün öncesinden belirtilmektedir.

5.4 Hayat Enerji Problemine Entegre Model

Oluşturun matematiksel modelin Hayat Enerji problemine entegre edilmesi sonucunda aşağıda belirtilen faydalar sağlanacaktır:

- Türbin ve maksonların 24 saatlik çalışma prensiplerinin belirlenmesi
- Şebekeden alınacak ve şebekeye satılacak olan elektrik miktarının 24 saat öncesinden belirlenmesi
- Şebeke alış-satışından kaynaklanan cezaların önüne geçilmesi
- Kağıt üretiminin enerji kısıtları dikkate alınarak planlanabilmesi
- Ürün tipine göre üretim planı değiştiğinde enerji planının değişimi anında görebilmesi

Model içinde belirtilen indislere ait kümeler Hayat Enerji problemi için aşağıda belirlenmiştir.

Hayat Kağıt bünyesinde iki farklı kağıt makinesinde 20 farklı tip kağıt üretildiği belirtilmiştir. Bu tiplerden 5'ine ait ürün reçeteleri tanımlanabilmiştir. Diğer değerler verilen değerler dikkate alınarak normal dağılıma göre rastgele yaratılmıştır. Oluşturulan rast gele değerlerin ortalamaları ve standart sapmaları Çizelge 5.2: KM1 Üretim Bilgileri. Çizelge 5.3: KM2 Üretim Bilgileri.

Çizelge 5.2: KM1 Üretim Bilgileri.

Makine Hızı Ortalaması	Makine Hızı Standart Sapması	Gramaj Ortalaması	Gramaj Standart Sapma	Buhar Basıncı Ortalama	Buhar Basıncı Standart Sapma
1576,5	20,9	20,66	2,4	4,03	0,2

Çizelge 5.3: KM2 Üretim Bilgileri.

Makine Hızı Ortalaması	Makine Hızı Standart Sapması	Gramaj Ortalaması	Gramaj Standart Sapma	Buhar Basıncı Ortalama	Buhar Basıncı Standart Sapma
1669,5	18,3	20,2	3,3	3,98	0,4

Hayat Enerji problemi kapsamında ısı, buhar ve elektrik enerji tipleri dikkate alınmıştır. Üretim ve konfor kullanımlarında 16 bar ve 3 bar basınçlı olmak üzere 2 tip buhar kullanılmaktadır. Farklı basınçlardaki buharlar farklı indislerle ifade edilmiştir. Enerji tiplerine göre indisler aşağıdaki gibidir:

$$e: \begin{cases} 1, & \text{Isı} \\ 2, & \text{Buhar 3 bar} \\ 3, & \text{Buhar 16 bar} \\ 4, & \text{Elektrik} \\ 5, & \text{Doğalgaz} \end{cases}$$

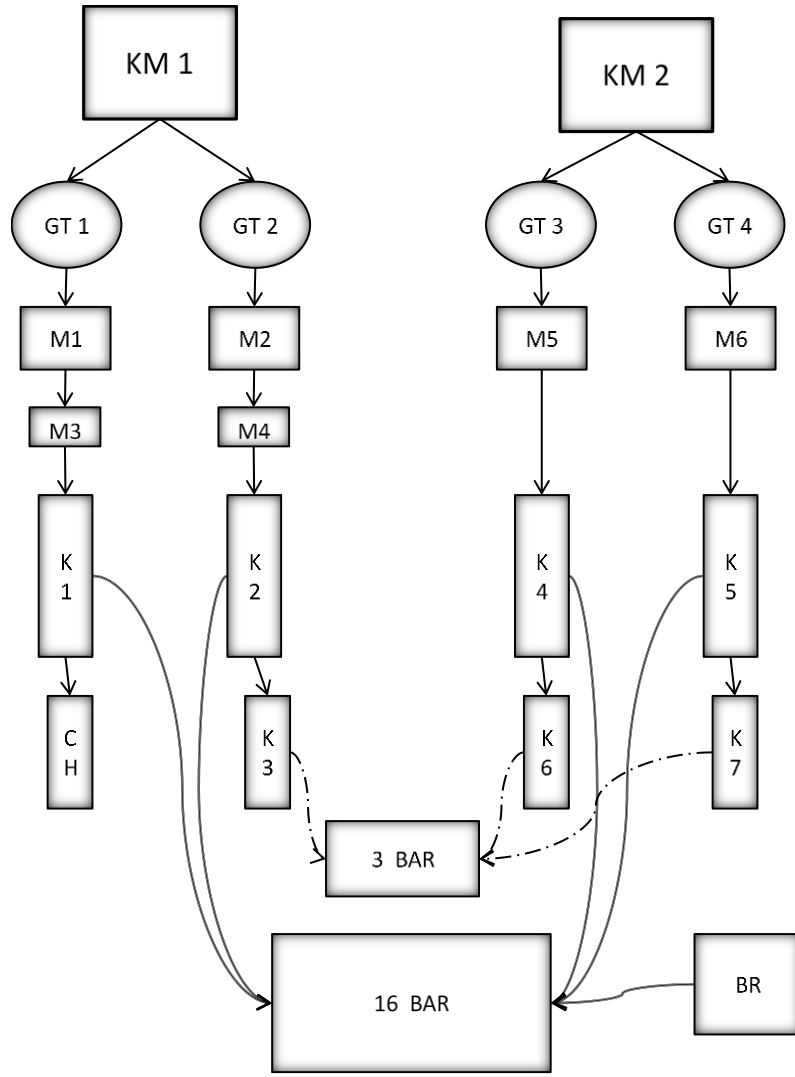
3 barlık buhar ihtiyacını karşılamak için 16 barlık buhar dönüştürülebilmektedir.

$$e = 3 \Rightarrow E'\{2\} \text{ olur.}$$

Çalışma kapsamında gaz türbini, brülör ve brülörlü kazan olmak üzere 3 tip kaynak ele alınmıştır.

- k:** {
- 1, Gaz Türbini 1
 - 2, Gaz Türbini 2
 - 3, Gaz Türbini 1
 - 4, Gaz Türbini 3
 - 5, *Brülör* 1
 - 6, *Brülör* 2
 - 7, *Brülör* 3
 - 8, *Brülör* 4
 - 9, *Brülör* 5
 - 10, *Brülör* 6
 - 11, *Brülörlü Kazan*

Mevcut sistemin fiziksel koşullarında, aynı besleme hattı üzerinde yer alan gaz türbini ve brülörler eş zamanlı kullanılamamaktır. Gaz türbinleri çalıştığında aynı hat üzerinde bulunan kazanlara egzoz gazı beslenmekte ve buhar üretimi sağlanmaktadır. Elde edilen buhar uygun basınçtaki toplama kazanına aktarılmaktadır. Toplanan buhar ihtiyaç seviyelerine göre dağıtılır. Brülör çalıştırma kararında ya gaz türbinleri düşük ayarda çalıştırılıp buhar ihtiyacı karşılanamadığında brülörlü kazan yakılmaktadır. Brülörlü kazan yakıldığında 16 bar basınçta buhar elde edilmek ve gerekli olduğunda bu buhar 3 bar basıncına düşürülmektedir. Şekil 5.3'te sistemin genel yapısı belirtilmiştir.



Şekil 5.3: Tesis Tasarımı.

K'_k kümesi her bir gaz türbini için aynı hat üzerinde yer alan brülörler, her bir brülör için o hattaki gaz türbinlerinden oluşmaktadır. Aynı hat üzerindeki brülörler eş zamanı çalışabilmektedir. Kümeler aşağıdaki gibidir:

$K'_1: \{5,7\}$	$K'_5: \{1\}$	$K'_7: \{1\}$
$K'_2: \{6,8\}$	$K'_6: \{2\}$	$K'_8: \{2\}$
$K'_3: \{9\}$	$K'_7: \{3\}$	
$K'_4: \{10\}$	$K'_8: \{4\}$	

Üretim süreçleri kaynakların ayar noktalarına göre belirlenmiştir. Her bir kaynağın çalışabileceği ayar noktaları birer süreç olmaktadır. Gaz türbini 1 için ayar noktası kümesi aşağıdaki gibi örneklenebilir:

$$S: \{4.5,4.6,4.7,4.8,4.9,5.0,5.1 \dots 7.8,7.9,8.0\}$$

Bu durumda, gaz türbini birin 1. Dönemde 5.5 MW elektrik üretecek şekilde çalıştırılması $y_{5,5,t}^1=1$ ile ifade edilecektir.

Süreçler ve süreçlerin sonucunda hangi enerji tipinden ne kadar elde edilebileceği geçmiş verilerin analizi ile elde edilmiştir. $k = 1, s = 5.5$ örneğinde üretilen elektrik miktarı $\varphi_{5,5,4} = 5.5, \varphi_{5,5,3} = 5.5, \varphi_{5,5,4} = 2.5$ olacaktır.

Hayat Enerji örneğinde ısı ihtiyacı net olarak analiz edilememiştir. Üretim tecrübesi ile elektrik ve buhar ihtiyacı karşılandığında karşılanacağı belirtilmiştir. Bu nedenle gaz türbini ve maksonların sabit ısı üreteceği ve kağıt tipine göre değişmeden ısı ihtiyacının bu sabit ihtiyaca eşit olacağı belirtilmiştir. Bu nedenle, $\varphi_{s,1} = 5.5$ $f^1(x_{i,t}^s) = E_{1,t} = 5.5$ kabul edilmiştir.

Hayat Enerji, üretim için gerekli buhar ve kuru ısıyı bünyesinde üretme zorunluluğundadır. Elektrik ise gerekli durumda şebekeden satın alınabilir. Ancak elektrik kalitesindeki değişimler üretimi doğrudan etkilediği için ihtiyacı üretme eğilimindedir. Bu nedenle model π_p ile ifade edilen ceza parametresi eklenmiştir. Bu parametre yalnızca gaz türbinlerinin bakım, arıza gibi nedenlere çalışmadığı durumda sistem dışından satın almaya izin verecek yüksek bir sayı olarak belirlenmiştir.

Elektrik kalitesi, Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliğinde belirtildiği üzere elektrik kalitesi tedarik sürekliliği kalitesi, ticari kalite ve teknik kalite kavramları ile ifade edilmektedir (EPDK, 2008). Tedarik sürekliliği kalitesi, kullanıcı taleplerinin en az kesinti süresi ve sıklığı ile makul maliyetlerle sağlanabilmesidir. Ticari kalite, alım-satım sözleşmelerin ve bu sözleşme kapsamındaki faaliyetlerin standartlara uygun olarak sağlanmasıdır. Teknik kalite gerilim, akım, frekans, dalga şekli değerlerinin kombinasyonu olarak tanımlanmıştır (Çaşkurlu, n.d.).

Hayat Kimya bünyesinde iç müşterilere aktarılan enerji miktarları maliyet üzerinden faturalandırılmaktadır. Toplam üretim maliyeti hesaplanırken iç müşteriye faturalandırılan miktarlar düşülmektedir. Bu nedenle enerji satış fiyatı iç müşteriye $(V_{e,t})$ ve dış müşteriye $V'_{e,t}$ özel olmak üzere ayrıştırılmıştır. Bu durumlar dikkate alındığında amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi değiştirilecektir:

$C_{t,e}^p$: t döneminde e enerji tipinin satın alma maliyeti

τ_k : k kaynağı yeniden başlatma maliyeti

π_p : sistem dışından satın alınan elektrik için ceza miktarı

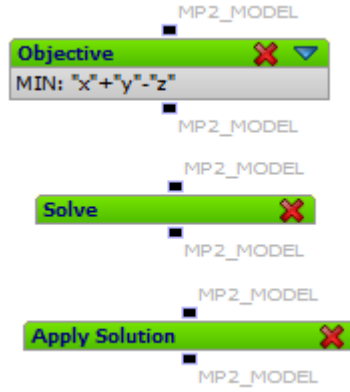
$$\text{Min } Z = \pi_p \cdot P_{t,e} + C_{t,e} \cdot P_{t,e} + \sum_s^S \sum_{t=1}^T \gamma_s \cdot C_{t,e} \cdot y_{s,t}^k - \sum_s^S \sum_{t=1}^T V_{e,t} \cdot (E_{e,t} - y_{s,t}^k) + (\sum_k^K \sum_t^T \tau_k \cdot r_{k,t}) \quad (5.1)$$

Elde edilen matematiksel model ICRON uygulaması ile programlanmıştır. Objeye tabanlı bu yazılımda, modelleme GSAMS adı verilen ortam aracılığı ile yapılmıştır. Bu ortamda, ilişkiler ve denklemler objeler üzerinden kurulmaktadır. Matematiksel model için özelleşmiş düğümler bulunmaktadır. Şekil 5.4. Karar Değişkeni Tanımlama. Şekil 5.4. Karar Değişkeni Tanımlama. ve Şekil 5.5. Amaç Fonksiyonu ve Çözüm.



Şekil 5.4. Karar Değişkeni Tanımlama.

Son olarak, amaç fonksiyonu tanımında en küçükleme ya da en büyükleme tercihi yapılır. Sonrasında “Çöz” komutu ile, elde edilen model CPLEX çözücüsüne aktarılır. Bu aktarım sırasında objeler üzerinden oluşturulan ilişkiler, denklemler haline dönüştürülür. Olurlu bir çözüm elde edilmesi durumunda, “Çözümü uygula” komutu ile belirlenen karar değişkenleri objeler ile ilişkilendirilir.



Şekil 5.5. Amaç Fonksiyonu ve Çözüm.

5.5 Model Çıktıları

Oluşturulan modelin, karar verilmesi istenen günden bir gün önce saat 11:00'e kadar çalıştırılması istenmektedir. Böylece gün öncesinden şebekeye satılması istenen güç miktarı tespit edilmiş olacaktır. Aynı zamanda minimize edilmiş olan amaç fonksiyonu değerinin üretilen toplam kağıt miktarına oranı ile kağıt birim ton maliyeti öngörülebilmiş olacaktır. Fiyat dalgalanması dikkate alınarak planlanan sistemin maliyetleri Çizelge 5.4'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.4. Puant Sistemi Elektrik Fiyatları.

00:00-06:00	06:00-17:00	17:00-22:00	22:00-00:00
Saatleri Arası	Saatleri Arası	Saatleri Arası	Saatleri Arası
6688 TL	5582 TL	4188 TL	6688 TL

Çıktılarının yorumlanabilmesi için elektrik satış fiyatlarının mevcut puant sisteminden alınarak model çalıştırılmıştır. Dikkate alınan elektrik fiyatları Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Bu fiyatlar dikkate alınarak maliyet hesapları yapıldığında yıllık toplam enerji maliyetinin 4,8904,560 TL değerinde olabileceği öngörülmüştür. Bu öngörü sistemin sabit değerlerde çalıştırılması ile karşılaştırıldığında yıllık maliyetin %15.36 değerinde azalacağı tespit edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Çalışmada Sonucunda Elde Edilenler

Bu çalışma sonucunda,

- Saatlik çalışma rejimlerinin belirlenmesi ile doğalgaz maliyetinin en aza indirgenmesi,
- Şebekeye satış durumunda cezai işlemlerin en küçüklenmesi
- Şebekeye satış durumunda, satılabilecek miktarların doğru tespiti ile avantajlı fiyattan faydalanma oranının artırılması
- Kağıt birim ton maliyetinin en küçüklenebilmesi hedeflenmiştir.

Oluşturulan model, bir çok üretim sisteminde uygulanabilecektir, ancak bir kağıt üreticisinin kojenerasyon sisteminde denenmiştir. Model oluşturulurken literatürdeki çalışmaların yanı sıra gerçek hayat problemleri yol gösterici olmuştur. Bu nedenle modelin faydalarının uygulamanın yapıldığı işletmede de kısa sürede görülmesi beklenmektedir.

6.2 Çalışmanın Enerji Üretimine Katkıları

Bu çalışmanın kojenerasyon sistemi kullanan ya da kullanabilecek üreticilere yardımcı olması hedeflenmiştir. Kojenerasyon sistemlerinin planlama probleminin, maliyet minimizasyonu bakış açısıyla çözülmesinin bu sistemlerin avantajlarını vurgulamada faydalı olacağı düşünülmektedir. Günlük planlama problemine sunulan bir çözümün, kojenerasyon sistemlerinin yaygınlaştırılmasında yararlı olması düşünülmektedir.

Aynı zamanda ihtiyaçların ve bu ihtiyaçlarının karşılanma yöntemlerinin tanınması ile enerji israfının önüne geçilebilmesi mümkün olacaktır. Bu konu gerçek yaşamdaki çözüm yöntemleriyle örneklendirilebilir. Örneğin, kağıt sektöründe, kağıt makinesi ve kojenerasyon sistemleri düzgün planlanmadığında, kağıt üretimini sürdürürebilmek için herhangi bir tip enerji miktarını karşılayabilmek için ihtiyaçtan

fazla üretime gidilebilmektedir. Üretim miktarları düzgün planlanmadığı için kuru ısı ve buharın bacalardan atılması sıkça karşılaşılan örneklerdendir.

6.3 Geliştirme Önerileri

Uygulama kapsamında günlük bazda kağıt üretim planı dikkate alınmıştır. Kağıt üretim sürecinin planlama problemi oldukça zor bir problemdir. Kağıt üretiminde ürün geçişleri bu zorluğun önemli nedenlerinden biridir. Aynı kazan içerisinde üretilen ürünlerin istenilen kimyasal değerleri sağlayabilmesi için, üretim planı yaparken geçiş kuralları kısıtlayıcı olmaktadır. Bu nedenle bir tip kağıdın üretimine başlandığında taleplerin izin verdiği aralıkta mümkün olduğunca, aynı üründen üretime devam edilmesi istenmektedir.

Bu çalışmada, hangi kağıdın hangi zamanlar arasında üretileceği bilgisi girdi olarak kabul edilirken, üretim yöntemlerine kadar verilmesi hedeflenmiştir. Kararlar bir gün zaman aralığı için saatlik bazda verilmektedir. Gelecek çalışmalarda, planlama aralığı genişlettirilecek, kağıt talepleri stok durumları dikkate alınarak kağıt üretim planını enerji ihtiyaçlarıyla birlikte planlanması faydalı olacaktır.

Ayrıca, stoka üretim yapan tüm sanayilerde uygulama denemeleri yapılmalıdır. Talep tahminleri de eklendiğinde, birkaç üretim için tek yerden enerji üreten firmalarda önemli bir araç haline getirilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmadi, P., Almasi, A., Shahriyari, M., & Dincer, I. (2012). Multi-objective optimization of a combined heat and power (CHP) system for heating purpose in a paper mill using evolutionary algorithm, (November 2010), 46–63. doi:10.1002/er
- Andreassi, L., Ciminelli, M. V., Feola, M., & Ubertini, S. (2009). Innovative method for energy management: Modelling and optimal operation of energy systems. *Energy and Buildings*, 41(4), 436–444. doi:10.1016/j.enbuild.2008.11.010
- Aras, H. (2003). Condition and development of the cogeneration facilities based on autoproduction investment model in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(6), 553–559. doi:10.1016/S1364-0321(03)00089-3
- Arcuri, P., Florio, G., & Fragiaco, P. (2007). A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex. *Energy*, 32(8), 1430–1447. doi:10.1016/j.energy.2006.10.023
- Arosio, S., Guilizzoni, M., & Pravettoni, F. (2011). A model for micro-trigeneration systems based on linear optimization and the Italian tariff policy. *Applied Thermal Engineering*, 31(14-15), 2292–2300. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.03.027
- Ashok, S. (2007). Optimised model for community-based hybrid energy system. *Renewable Energy*, 32(7), 1155–1164. doi:10.1016/j.renene.2006.04.008
- Babu, C. a., & Ashok, S. (2008). Peak Load Management in Electrolytic Process Industries. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2), 399–405. doi:10.1109/TPWRS.2008.920732
- Babu, C. a., & Ashok, S. (2009). Optimal utilization of renewable energy-based IPPs for industrial load management. *Renewable Energy*, 34(11), 2455–2460. doi:10.1016/j.renene.2009.02.032
- Badami, M., & Mura, M. (2010). Exergetic analysis of an innovative small scale combined cycle cogeneration system. *Energy*, 35(6), 2535–2543. doi:10.1016/j.energy.2010.02.053
- Benelmir, R., Feidt, M., Poincare, Â. H., Nancy, Â. I., & Enege, L. (1998). ENERGY COGENERATION SYSTEMS AND ENERGY MANAGEMENT STRATEGY, 39(16), 1791–1802.
- Bergaentzlé, C., Clastres, C., & Khalfallah, H. (2014). Demand-side management and European environmental and energy goals: An optimal complementary approach. *Energy Policy*, 67, 858–869. doi:10.1016/j.enpol.2013.12.008

- Bhattacharyya, S. C., & Thuy Hien, N. (2005). Cogeneration potential in pulp and paper industry of Vietnam. *International Journal of Energy Research*, 29(4), 345–358. doi:10.1002/er.1063
- Bracco, S., Dentici, G., & Siri, S. (2013). Economic and environmental optimization model for the design and the operation of a combined heat and power distributed generation system in an urban area. *Energy*, 55, 1014–1024. doi:10.1016/j.energy.2013.04.004
- Brown, D., Maréchal, F., & Paris, J. (2005). A dual representation for targeting process retrofit, application to a pulp and paper process. *Applied Thermal Engineering*, 25(7), 1067–1082. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.07.024
- Cakembergh-Mas, A., Paris, J., & Trépanier, M. (2010). Strategic simulation of the energy management in a Kraft mill. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 988–997. doi:10.1016/j.enconman.2009.12.001
- Cali, M., Santarelli, M., & Leone, P. (2007). Design of experiments for fitting regression models on the tubular SOFC CHP100kWe: Screening test, response surface analysis and optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(3), 343–358. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.05.021
- Cardona, E., & Piacentino, a. (2007). Optimal design of CHCP plants in the civil sector by thermoeconomics. *Applied Energy*, 84(7-8), 729–748. doi:10.1016/j.apenergy.2007.01.005
- Cardona, E., Piacentino, A., & Cardona, F. (2006). Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems. *Energy Conversion and Management*, 47(20), 3530–3542. doi:10.1016/j.enconman.2006.02.027
- Cardona, E., Sannino, P., Piacentino, a., & Cardona, F. (2006). Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant. *Applied Thermal Engineering*, 26(14-15), 1437–1447. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.01.020
- Carpaneto, E., Chicco, G., Mancarella, P., & Russo, A. (2007). A Decision Theory Approach to Cogeneration Planning in the Presence of Uncertainties. 2007 *IEEE Lausanne Power Tech*, 1435–1440. doi:10.1109/PCT.2007.4538526
- Carvalho, M., Serra, L. M., & Lozano, M. A. (2011). Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. *Energy*, 36(6), 3779–3790. doi:10.1016/j.energy.2010.09.023
- Chicco, G., & Mancarella, P. (2009). Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization. *Energy*, 34(3), 261–273. doi:10.1016/j.energy.2008.09.011
- Cho, H., Mago, P. J., Luck, R., & Chamra, L. M. (2009). Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption,

- and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme. *Applied Energy*, 86(12), 2540–2549. doi:10.1016/j.apenergy.2009.04.012
- Costa, A., & Fichera, A. (2014). A mixed-integer linear programming (MILP) model for the evaluation of CHP system in the context of hospital structures. *Applied Thermal Engineering*, 1–9. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.02.051
- Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği. (2009). *T.C. Resmi Gazete*, 27200.
- Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik. (n.d.).
- Elhanan, A. E., & Derbentli, T. (2007). Gaz türbinli kojenerasyonla elektrik üretimi ve soğutma, 5-6(212), 47–58.
- Facci, A. L., Andreassi, L., & Ubertini, S. (2014). Optimization of CHCP (combined heat power and cooling) systems operation strategy using dynamic programming. *Energy*, 66, 387–400. doi:10.1016/j.energy.2013.12.069
- Ferreira, E. M., Balestieri, J. A. P., & Zanardi, M. A. (2010). Optimization analysis of dual-purpose systems. *Desalination*, 250(3), 936–944. doi:10.1016/j.desal.2009.06.010
- Floudas, C. a. (1995). *Nonlinear and Mixed-Integer Optimization: Fundamentals and Applications* (p. 475). Oxford University Press, USA.
- Freschi, F., Giaccone, L., Lazzeroni, P., & Repetto, M. (2013). Economic and environmental analysis of a trigeneration system for food-industry: A case study. *Applied Energy*, 107, 157–172. doi:10.1016/j.apenergy.2013.02.037
- Ghaebi, H., Saidi, M. H., & Ahmadi, P. (2012). Exergoeconomic optimization of a trigeneration system for heating, cooling and power production purpose based on TRR method and using evolutionary algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 36, 113–125. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.11.069
- Gu, W., Wu, Z., Bo, R., Liu, W., Zhou, G., Chen, W., & Wu, Z. (2014). Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54, 26–37. doi:10.1016/j.ijepes.2013.06.028
- Henning, D., Amiri, S., & Holmgren, K. (2006). Modelling and optimisation of electricity, steam and district heating production for a local Swedish utility. *European Journal of Operational Research*, 175(2), 1224–1247. doi:10.1016/j.ejor.2005.06.026
- Henning, D., & Trygg, L. (2008). Reduction of electricity use in Swedish industry and its impact on national power supply and European CO2 emissions. *Energy Policy*, 36(7), 2330–2350. doi:10.1016/j.enpol.2007.08.033

- Jiménez-Espadafor Aguilar, F., García, M. T., Trujillo, E. C., Becerra Villanueva, J. A., & Florencio Ojeda, F. J. (2011). Prediction of performance, energy savings and increase in profitability of two gas turbine steam generator cogeneration plant, based on experimental data. *Energy*, 36(2), 742–754. doi:10.1016/j.energy.2010.12.049
- Jing, Y.-Y., Bai, H., & Wang, J.-J. (2012). Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of BCHP system based on life cycle assessment. *Energy*, 37(1), 405–416. doi:10.1016/j.energy.2011.11.014
- Kavvadias, K. C., & Maroulis, Z. B. (2010). Multi-objective optimization of a trigeneration plant. *Energy Policy*, 38(2), 945–954. doi:10.1016/j.enpol.2009.10.046
- Kojenerasyon Nedir. (n.d.). Retrieved March 05, 2013, from http://www.turkoted.org/diger_menusuler.asp?id=1
- Kojenerasyon Nedir? (n.d.). Retrieved March 14, 2013, from <http://kojenerasyon.net/kojenerasyon-nedir.html>
- Kojenerasyon Sistemi. (n.d.). *3-Kojenerasyon Sistemi. (n.d.). Retrieved from <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/kojenerasyon-sistemi/4286#ad-image-0>*. Retrieved March 13, 2013, from <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/kojenerasyon-sistemi/4286#ad-image-0>
- Kolmek, F. (2012). Gün Öncesi Elektrik Piyasasında Saatlik Fiyat Tahmini. Retrieved from <http://fatihkolmek.blogspot.com.tr/p/gun-oncesi-elektrik-piyasasnda-saatlik.html>
- Kong, X. Q., Wang, R. Z., & Huang, X. H. (2005). Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines. *Applied Thermal Engineering*, 25(2-3), 377–391. doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.06.014
- Kong, X. Q., Wang, R. Z., Li, Y., & Huang, X. H. (2009). Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 530–538. doi:10.1016/j.enconman.2008.10.020
- Kralj, A. K., & Glavič, P. (2007). Optimization of a gas turbine in the methanol process, using the NLP model. *Applied Thermal Engineering*, 27(11-12), 1799–1805. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.01.005
- Kubilay, E. (n.d.). BİR KOJENERASYON TESİSİ İÇİN FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI4-BİR KOJENERASYON TESİSİ İÇİN FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI. (n.d.). Retrieved from <http://www.dektmk.org.tr/upresimler/EKUBILAY.pdf>. Retrieved March 01, 2013, from <http://www.dektmk.org.tr/upresimler/EKUBILAY.pdf>

- Lee, C.-C., & Chang, C.-P. (2007). The impact of energy consumption on economic growth: Evidence from linear and nonlinear models in Taiwan. *Energy*, 32(12), 2282–2294. doi:10.1016/j.energy.2006.01.017
- Lima, R. (n.d.). IBM ILOG CPLEX What is inside of the box? Retrieved December 09, 2014, from http://egon.cheme.cmu.edu/ewocp/docs/rlima_cplex_ewo_dec2010.pdf
- Liu, H., Lee, S., Kim, M., Shi, H., Kim, J. T., Wasewar, K. L., & Yoo, C. (2013). Multi-objective optimization of indoor air quality control and energy consumption minimization in a subway ventilation system. *Energy and Buildings*, 66, 553–561. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.066
- Liu, P., Gerogiorgis, D. I., & Pistikopoulos, E. N. (2007). Modeling and optimization of polygeneration energy systems. *Catalysis Today*, 127(1-4), 347–359. doi:10.1016/j.cattod.2007.05.024
- Lorca, Á., & Prina, J. (2014). Power portfolio optimization considering locational electricity prices and risk management. *Electric Power Systems Research*, 109, 80–89. doi:10.1016/j.epsr.2013.12.004
- Lozano, M. a., Ramos, J. C., & Serra, L. M. (2010). Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints. *Energy*, 35(2), 794–805. doi:10.1016/j.energy.2009.08.022
- Mago, P. J., & Hueffed, A. K. (2010). Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies. *Energy and Buildings*, 42(10), 1628–1636. doi:10.1016/j.enbuild.2010.04.005
- Marshman, D. J., Chmelyk, T., Sidhu, M. S., Gopaluni, R. B., & Dumont, G. a. (2010). Energy optimization in a pulp and paper mill cogeneration facility. *Applied Energy*, 87(11), 3514–3525. doi:10.1016/j.apenergy.2010.04.023
- Moon, J.-Y., Shin, K., & Park, J. (2013). Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1-4), 523–535. doi:10.1007/s00170-013-4749-8
- Nishi, T., Sekiya, E., & Yin, S. (2012). Distributed Optimization of Energy Portfolio and Production Planning for Multiple Companies Under Resource Constraints. *Procedia CIRP*, 3, 275–280. doi:10.1016/j.procir.2012.07.048
- Obara, S. (2007). Dynamic operation plan of a combined fuel cell cogeneration , solar module , and geo-thermal heat pump system using Genetic Algorithm, (December 2006), 1275–1291. doi:10.1002/er
- Oh, S., Lee, H., Jung, J., & Kwak, H. (2007). Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system. *Energy*, 32(5), 760–771. doi:10.1016/j.energy.2006.05.007

- Olanrewaju, O. ., & Jimoh, a. . (2014). Review of energy models to the development of an efficient industrial energy model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 661–671. doi:10.1016/j.rser.2013.11.007
- Olsina, F., Garcés, F., & Haubrich, H.-J. (2006). Modeling long-term dynamics of electricity markets. *Energy Policy*, 34(12), 1411–1433. doi:10.1016/j.enpol.2004.11.003
- Ozdemir, O. (n.d.). 5. Retrieved from <http://www.geposb.com.tr/tr/UploadPdf/OmerOZDEMIRSunum.pdf>
- Sabo, K., Scitovski, R., Vazler, I., & Zekić-Sušac, M. (2011). Mathematical models of natural gas consumption. *Energy Conversion and Management*, 52(3), 1721–1727. doi:10.1016/j.enconman.2010.10.037
- Somasundaram, S., & Parker, S. (1999). Ukraine : Emerging Market For Industrial Energy Efficiency Opportunities, (June 2014), 37–41. doi:10.1080/01998595.1999.10530453
- Swanepoel, J. A., Mathews, E. H., Vosloo, J., & Liebenberg, L. (2014). Integrated energy optimisation for the cement industry: A case study perspective. *Energy Conversion and Management*, 78, 765–775. doi:10.1016/j.enconman.2013.11.033
- Taha, H. A. (Arkansas Ü. (2003). *Yöneylem Araştırması* (3rd ed., p. 910). Literatür Yayıncılık.
- Tarihsel Gelişim. (n.d.). Retrieved March 14, 2013, from <http://www.btisi.com.tr/kojenerasyon.asp>
- Tina, G. M., & Passarello, G. (2012). Short-term scheduling of industrial cogeneration systems for annual revenue maximisation. *Energy*, 42(1), 46–56. doi:10.1016/j.energy.2011.10.025
- Wakui, T., Kinoshita, T., & Yokoyama, R. (2014). A mixed-integer linear programming approach for cogeneration-based residential energy supply networks with power and heat interchanges. *Energy*, 68, 29–46. doi:10.1016/j.energy.2014.01.110
- Winston, W. L. (2003). *Operation Research Applications and Algorithms*. Duxbury Press.
- Witzani, M., & Pechtl, P. (1996). Modeling of (Cogeneration) Power Plants on Time-Dependent Power Demands of the Consumer. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 118, 353–358.
- Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, a., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753–1766. doi:10.1016/j.rser.2010.12.008

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Meltem KUNT

Doğum Yeri ve Tarihi : Aydın 23/05/1988

E-Posta :meltemkunt@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstriyel Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

ICRON Technologies - Uygulama Danışmanı (2011-Halen devam ediyor).

