



**BÖLGE-ÖLÇEKLİ DAĞITIK ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇİN
KAPSAMA MESAFESİ TEMELLİ AĞ TASARIMI**

Yeşim OK

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2016

Yeşim OK tarafından hazırlanan “BÖLGE ÖLÇEKLİ DAĞITIK ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇİN KAPSAMA MESAFESİ TEMELLİ AĞ TASARIMI ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman Doç. Dr. Mehmet ATAK

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Cafer ÇELİK

Endüstri Mühendisliği, Atatürk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. M. Ali AKCAYOL

Bilgisayar Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Saadettin Erhan KESEN

Endüstri Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 30/06/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yeşim OK

30/06/2016

BÖLGE-ÖLÇEKLİ DAĞITIK ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇİN KAPSAMA MESAFESİ TEMELLİ AĞ TASARIMI

(Doktora Tezi)

Yeşim OK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2016

ÖZET

Bu tez çalışmasında, dağıtık enerji üretim kaynaklarının enerjiyi tüketen binalar dışında konumlandırıldığı ve üretilen enerjilerin enerji dağıtım ağları aracılığıyla talep noktalarına ulaştırıldığı optimal bir sistemin tasarlanması amaçlanmıştır. Bölge (ölçekli) Isıtma/Soğutma Ağları da termal ve elektrik iletim kayıpları ile birlikte dikkate alınmıştır. Önerilen modelde, küme kaplama problemindeki azami kapsama mesafesi, bir kısıt yardımıyla, kapasiteli sabit maliyetli yer seçimi modeline ilave edilmiştir. Kapsama mesafesi kısıtının modele eklenmesi ile dağıtım ağındaki arz talep noktaları arasında sınırlandırılmamış mesafelerden doğan enerji kayıplarının ve fazla maliyetlerin azaltılması ile toplam maliyetlerin azalması ve sistem etkinliğinin artması amaçlanmıştır. Mevcut literatürden farklı olarak bu model ile tesisler ve müşteriler arası mesafenin modelde verilen kapsama mesafesinden daha büyük olmasına izin verilmemiştir. Böylelikle kapasiteli sabit maliyetli yer seçimi problemindeki tesis - müşteri arası uzaklıkların dikkate alınmaması zayıflığı giderilmiş ve kurulacak tesisin boyut ve tipine (ikili/üçlü) göre ilk yatırım maliyetleri ve talep ağırlıklı müşteri-tesis uzaklığından doğan taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen modelin sayısal uygulaması, farklı kapsama mesafeleri üzerinden yapılmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamasında ise farklı boyutlarda 100 adet test problemi için model sınırları denenmiş ve devamında sezgisel bir çözüm yöntemi geliştirilip çözüm kabiliyeti matematiksel model ile karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 90610
Anahtar Kelimeler : Dağıtık enerji kaynakları, bölgesel enerji sistemleri, sabit maliyet, tesis yer seçimi, birleşik soğuk / ısı ve güç üretimi, kojenerasyon, trijenerasyon, bölgesel ısıtma soğutma ağı, bölge-ölçekli
Sayfa Adedi : 76
Danışman : Doç. Dr. Mehmet ATAĞ

THE NETWORK DESIGN FOR DISTRICT-SCALE DISTRIBUTED ENERGY
GENERATION SYSTEMS BASED ON COVERAGE DISTANCE

(Ph. D. Thesis)

Yeşim OK

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2016

ABSTRACT

In this thesis, it is aimed to design an optimal system in which distributed energy resources (DERs) are located outside of the consumer buildings and the produced energy is distributed to demand points through the energy distribution networks. District (scale) Heating / Cooling Network is also taken into account together with thermal and electrical transmission losses. In the proposed model, maximum coverage distance (D_c) of set covering problem is added into the capacitated fixed-charge model by the help of a constraint. It is aimed to decrease overall costs and increase system efficiency by including the coverage distance constraint within the model that reduces energy losses and excess costs in energy distribution network in consequence of the unbounded distances between supply and demand points. Different from the existing literature, distance between customers and facilities is not allowed to be greater than the range, which is previously introduced within the model. Thus, the weakness of the capacitated fixed charge problem is eliminated by ignoring distance between facilities and consumers and initial investment costs based on the size and type (double / triple) of the plant and demand-weighted transportation costs are aimed to minimize. The numerical applications of the developed model are made with different coverage distances. In the later stages of the study, model limits are tested with 100 problems of different sizes and a hybrid heuristic solution method is also developed and its problem solving ability is compared with mathematical model results.

Science Code : 90610

Key Words : Distributed energy resources, district energy systems, fixed charge, facility location, coverage distance, combined cooling / heating and power generation, cogeneration, trigeneration, district heating and cooling network, district-scale

Page Number : 76

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mehmet ATAĞ

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında ve tüm lisansüstü öğrenimim boyunca katkıları ile bana yön veren kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet ATAĞ' a, bu süreçte desteklerini benden esirgemeyen tez izleme komitesi üyesi değerli hocalarım Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN ve Prof. Dr. M. Ali AKCAYOL' a şükranlarımı sunarım.

Doktora tezimi, tüm bu çalışmalarım sırasında, destek ve ilgisi ile her zaman yanımda olan sevgili eşim Yakuphan OK' a, çocuklarım Yusuf Alperen, Feyza Melek ve Burcu Irmak'a, bugünleri görmesini çok istediğim rahmetli annem Naran SİNİCİ 'ye, sevgili babam Selahattin SİNİCİ' ye, bu mesleği seçmemde vesile olan ağabeyim Hakan SİNİCİ' ye ve uzakta da olsa hep yanımda olabilen ablam Nurdan KÜLERİ' ye ithaf ediyorum.

Tez çalışmamda yardımlarını benden esirgemeyen arkadaşım Arş. Gör. Dr. Emre ÇALIŞKAN' a da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
2.1. Dağıtık Enerji Sistemleri için Literatür Araştırması.....	11
2.2. Tesis Yer Seçimi Problemleri için Literatür Araştırması.....	21
2.2.1. Tesis yer seçimi problemlerinin sınıflandırılması.....	21
3. BÖLGE ÖLÇEKLİ DAĞITIK ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇİN KAPSAMA MESAFESİ TEMELLİ AĞ TASARIMI	29
3.1. Geliştirilen Modelin Özellikleri, Varsayımları ve Katkısı.....	29
3.2. Matematiksel Model	30
3.2.1. Notasyonlar.....	30
3.3. Örnek Problem.....	33
3.3.1. Parametrelerin tasarımı.....	34
3.3.2. Elde edilen sonuçlar	38
3.3.3. Farklı kapsama mesafeleriyle elde edilen çözümlerin değerlendirilmesi...	43
3.4. Modelin Test Edilmesi	45
3.4.1. Test sonuçları.....	46

	Sayfa
3.4.2. Test sonuçlarının değerlendirilmesi	47
4. GELİŞTİRİLEN SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ	49
4.1. Genetik Algoritma	49
4.2. Çözüm Yönteminin İşleyişi.....	49
4.3. Elde Edilen Sonuçlar.....	54
5. SONUÇ	57
KAYNAKLAR	59
EKLER	64
EK-1. Test problemlerinin GAMS sonuçları.....	65
EK-2. Sezgisel çözüm yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırması – I.....	70
EK-3. Sezgisel çözüm yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırması – II.	73
ÖZGEÇMİŞ	76

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. AB ülkeleri arasında birleşik ısı-güç üretiminin toplam elektrik üretimi içindeki payı.....	8
Çizelge 3.1. Örnek problem için talep noktaları, enerji türüne göre talep miktarları	35
Çizelge 3.2. Müşteriler ile tesisler arası uzaklıklar.....	36
Çizelge 3.3. Boyutlarına göre tesislerin kapasiteleri.....	37
Çizelge 3.4. Tesislerin ilk yatırım maliyetleri	37
Çizelge 3.5. Farklı kapsama mesafelerine göre elde edilen sonuçlar	39
Çizelge 3.6. $D_c = 2$ hm (200 m) için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları.....	39
Çizelge 3.7. $D_c = 3$ hm (300 m) için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları.....	40
Çizelge 3.8. $D_c = 6$ hm için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları.....	40
Çizelge 3.9. $D_c = 8$ hm için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları.....	41
Çizelge 3.10. $D_c = 10$ hm için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları.....	42
Çizelge 3.11. $D_c = 12$ hm için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları	42
Çizelge 3.12. Problem setleri için matematiksel model ile elde edilen ortalama çözüm sonuçları	46
Çizelge 4.1. Genetik Algoritma ile kullanılan başlangıç parametreleri	54
Çizelge 4.2. Geliştirilen sezgisel yöntem sonuçlarının GAMS sonuçları ile karşılaştırması	55
Çizelge 4.3. Küçük boyutlu problem setlerinde geliştirilen sezgisel çözüm yöntemi ile elde edilen sonuçlar	56

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Konvansiyonel yöntem ile birleşik ısı-güç üretiminin verimlilik açısından karşılaştırması	1
Şekil 1.2. Birleşik ısı-güç sisteminin çıktıları.....	3
Şekil 1.3. Trijenerasyon sistemlerinde enerji akış diyagramı.....	4
Şekil 1.4. Türkiye’de Elektrik Üretimi.....	5
Şekil 1.5. Avrupa’da Kojenerasyon Kullanımı.....	9
Şekil 3.1. Bölgesel ölçekli dağıtık enerji üretim ağının temsili gösterimi	34
Şekil 3.2. Örnek problemde kapsama mesafesi 300 ve 1000 metre için atama sonuçlarının şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.3. Kapsama mesafesinin model çıktıları üzerindeki etkisi	44
Şekil 3.4. Optimali bulan (I) ve optimali bulamayan (II) test problemleri için kapsama mesafesi ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişki.....	47
Şekil 3.5. Optimali bulamayan 5 ila 40 müşterili ve 50 ila100 müşterili test problemleri için kapsama mesafesi ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişki...	47
Şekil 3.6. Modelin çalışma süresi ile kapsama mesafesi ve müşteri sayısı arasındaki ilişki	48
Şekil 4.1. Uniform çaprazlama örneği	50
Şekil 4.2. Kromozom yapısı	52
Şekil 4.3. Sezgisel çözüm yönteminin akış şeması.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

GWh	Gigawatt-saat
kW h	Kilowatt saat
hm	hektametre
MW	Megawatt
m²	Metrekare
€	Euro

Kısaltmalar

Açıklamalar

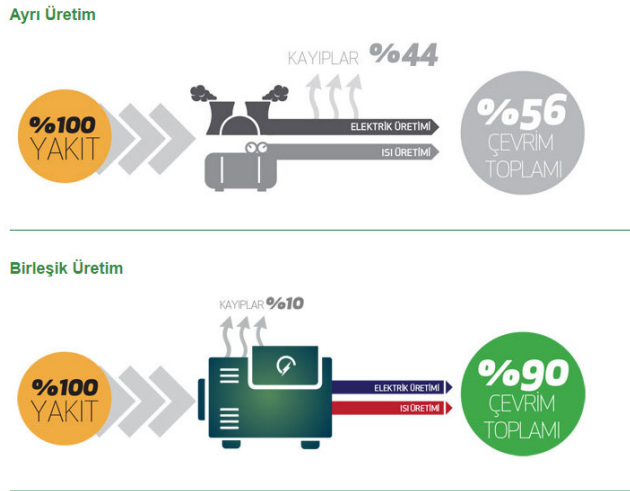
BISA	Bölgesel Isıtma Soğutma Ağı
DEK	Dağıtık Enerji Kaynakları
DHCN	District Heating and Cooling Network
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FCFL	Fixed Charge Facility Location
KTDP	Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama
MILP	Mixed Integer Linear Programming

1. GİRİŞ

21. yüzyılın en önemli sorunlarından biri de birincil enerji kaynakları olarak bilinen petrol ve kömür gibi fosil yakıtların hızla tükenmesinin beraberinde getirdiği yoğun çevresel tahribat ve ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının sebep olduğu küresel ısınma, iklim değişikliği vb. ile sonuç olarak tüketilen geleceğimizdir. Bu bağlamda, hızla artan nüfusa paralel olarak tüketim ve enerji ihtiyacının da sürekli arttığı ancak mevcut kaynakların gün geçtikçe azaldığı Dünyamızda, enerjinin etkin ve verimli kullanımı hem ekonomik hem de çevresel bir zorunluluk halini almıştır.

Buradaki verimlilik kavramı, hem aynı miktar enerjiyle daha çok işin yapılmasını veya aynı miktar işin daha az enerji tüketilerek yapılmasını hem de daha az maliyet ve daha az birincil kaynak kullanımıyla daha çok enerji üretilmesini kapsamaktadır. Kısacası hem enerjinin üretimi ve iletimi, hem de tüketimi alanında etkinliğin sağlanması en az yeni ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımı kadar önem taşımaktadır.

Geleneksel yollarla elektrik üretiminde ortalama verim %35 ve kayıplar ise atık ısı veya başka şekilde olmak üzere toplam %65’lerdedir. Geleneksel yollarla kullanım noktalarından çok uzak mesafelerde elektrik üretildiği için üretilen elektriğin yaklaşık %10 - 25’i dağıtım ve iletim esnasında kayıp olarak verilmektedir.



Şekil 1.1. Konvansiyonel yöntem ile birleşik ısı-güç üretiminin verimlilik açısından karşılaştırması [1]

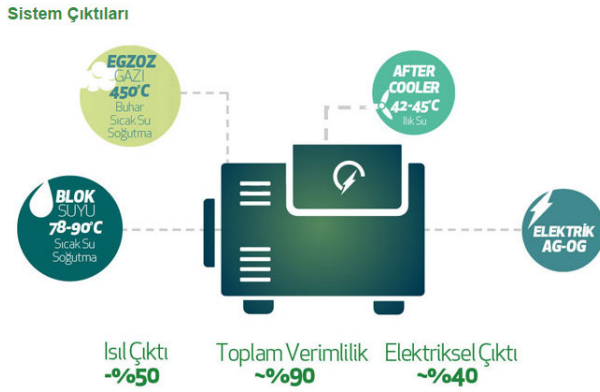
Enerji üretiminin yoğun bir şekilde çevreye zarar veren bir süreç olduğu bilinmektedir. Enerji üretim sistemlerinin fosil yakıtları en yüksek verimlilikte kullanarak en düşük boyutta çevresel zarara yol açacak yöntemlerle yeniden yapılandırılması gereği gün geçtikçe artmaktadır. Bu amaçla çoklu enerji üretim sistemlerine (tekkaynaktan birden çok enerjinin elde edildiği sistemlere) geçiş süreci özellikle gelişmiş ülkelerde ivme kazanmıştır. Geleneksel enerji üretim sistemlerine göre, bileşik ısı-güç veya üçlü (elektrik, ısıtma ve soğutma enerjileri) üretim sistemleri ile çok daha verimli enerji kullanımı mümkün olmaktadır.

Bileşik ısı-güç üretimi yeni bir teknoloji değildir. Uzun yıllardır bilinen bir uygulama olmakla birlikte 1970'lerden sonra yaygınlık kazanmıştır. Bileşik ısı-güç üretimi uygulamasını yaygınlaştıran birinci etken, birincil enerji kaynağının etkin kullanımıdır. Bileşik ısı-güç üretimi, güç üreten bir ısı makinesinin çevreye atmak zorunda olduğu ısı enerjisi yararlı bir amaca yönlendirir. Böylelikle atmosfere salınan başta karbon dioksit olmak üzere sera etkisi yaratan gazların salınımı azalır. Bileşik ısı-güç üretim tesislerinin sera gazı salınımı, yaklaşık olarak, Kombine Çevrim Santrallerinden %50 ve kömür santrallerinden ise %67 daha azdır. Ayrıca, bölgesel enerji üretim tesisleri, merkezi enerji üretim noktalarına nazaran son kullanıcıya yakın noktalarda kurulduklarından enerji iletim kayıplarını önemli miktarda azalttıkları gibi, elektrik sunum gerilimindeki değişim de elektrik kesintisi gibi sorunları en aza indirmektedir [2].

Bileşik ısı-güç üretimi için bugüne kadar gaz türbinleri, dizel ve gaz motorları, buharlı güç santralleri, birleşik gaz-buhar (kombine) santralleri kullanılmıştır. Bileşik ısı-güç üretimi uygulamasındaki gelişmeler giderek daha küçük kapasiteli santrallerin kullanılması yönünde olmaktadır. 1950 de ölçek 50 ile 100 MW iken 2000 yılında 1 ile 10 MW arasında olmuştur. 2012 yılında ise 1 KW' a kadar inen çok daha küçük ölçeklerden söz etmek olanaklıdır [2].

Kojenerasyon

Kullanılabilir ısı ve elektrik enerjisinin birlikte eşzamanlı olarak üretimi şeklinde tanımlanmaktadır. Bu sistemle elektrik enerjisi üretimi sırasında egzoz gazları ile atılan ısı enerjisinin, geri kazanılması ve elektrik enerjisinin iletimindeki kayıplar ortadan kaldırılarak, sistem veriminin %90-92'lere kadar çıktığı görülmektedir. (Bkz. Şekil 1.2)

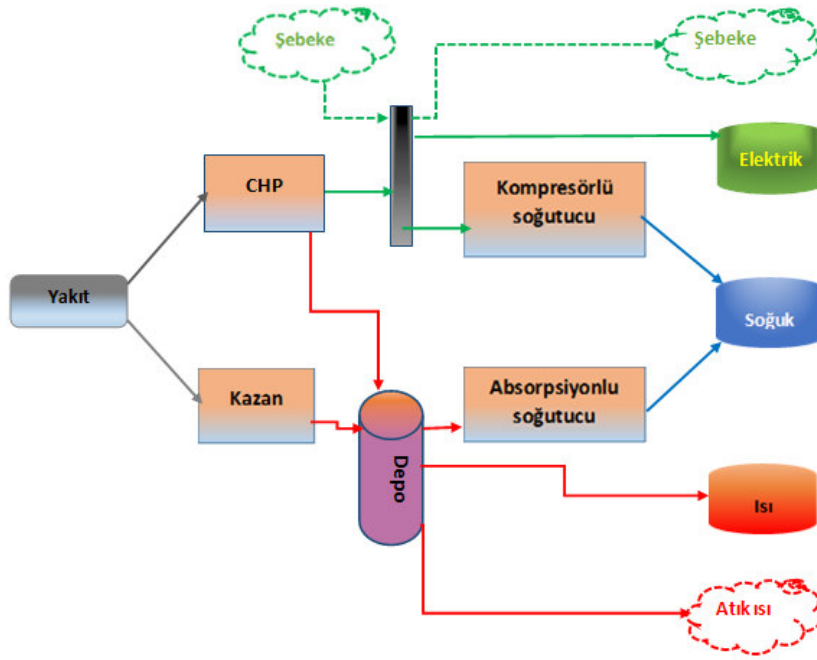


Şekil 1.2. Birleşik ısı-güç sisteminin çıktıları [3]

Kojenerasyon üretim tesislerinde yakıt olarak yaygın şekilde doğalgaz kullanılmaktadır. Böylece kömürün yanması sonucu meydana gelen kül ve kükürt oksitler ile fueloilin sebep olduğu diğer emisyonlar bertaraf edilebilmektedir. Özellikle CO₂ ve SO₂ emisyonlarında önemli miktarda kazanımlar elde edilir.

Trijenerasyon

Kojenerasyon sistemlerine soğutucu sistemlerin entegrasyonu ile ısı ve elektrik enerjisinin yanı sıra kojenerasyonun atık gazından elde edilen sıcak su veya buhar ile soğuk suyun da elde edilebildiği “üçlü enerji üretim” sistemlerine de “Trijenerasyon” sistemleri adı verilir. (Bkz. Şekil 1.3) Bu sayede birincil enerji kaynağından dört farklı enerji (sıcak su, buhar, soğutulmuş su ve elektrik enerjisi) üretilmektedir. Üçlü üretim sistemleri, kojenerasyon sistemlere kıyasla %50’ye kadar daha verimli olabilmektedirler.[3]



Şekil 1.3. Trijenerasyon sistemlerinde enerji akış diyagramı [4]

Trijenerasyon tesislerinde kullanılan yakıt tipi genel olarak doğalgazdır. Doğalgazın ekonomik oluşu, depolanma gereksiniminin olmaması, yanma özelliğinin iyi olması ve çevre dostu olması kullanım alanını genişletmektedir.

Trijenerasyon tesislerinin en büyük üstünlüğü, gereksinim duyulan enerji türlerini istenildiği zaman ve miktarda üretebilmesidir. Bu tesisler, kendi enerjilerini kendileri ürettiklerinden dışa bağımlı değildir. Üretilen enerjideki kalite ve devamlılık ise diğer bir üstünlüğüdür. Böylece elektrik kesilmesi, frekans ve voltajdaki düzensizlikler ortadan kalkmış olmaktadır.

Trijenerasyon tesislerinde egzoz gazlarından faydalandığından CO₂ emisyonları oldukça düşüktür. Böylece sistem çevre kirliliği yönünden de avantajlı durumdadır.

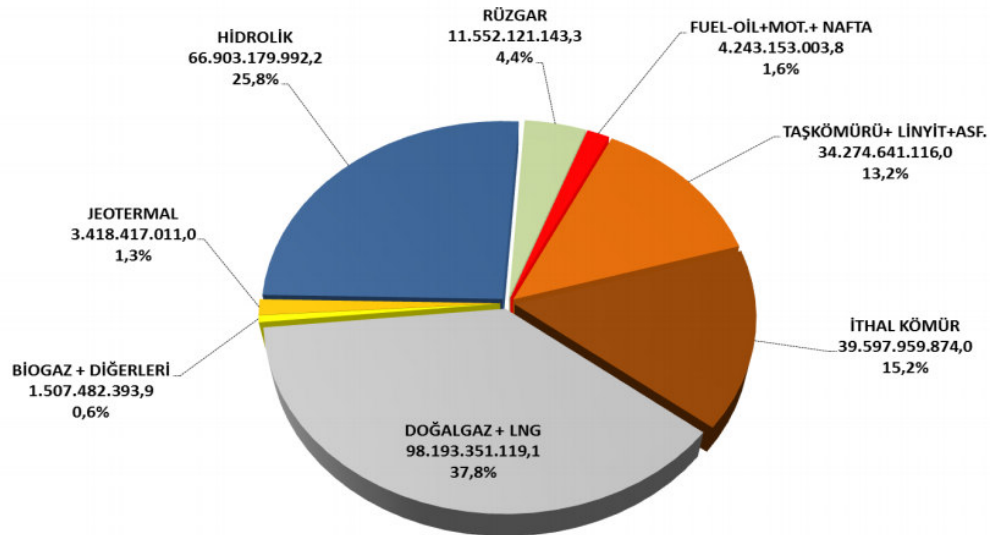
Trijenerasyon sistemleri genellikle mümkün olduğunca ısıнын ve elektriğın kullanıldığı yere yakın kurulduğu için hem daha az kayıp verir hem de bakım ve tamir zorluklarının birçoğundan uzak olur. Ayrıca ihtiyaç duyulan enerji miktarına çok yakın kapasitede

tasarlanırlar. Bu nedenle konvansiyonel sistemlere nazaran ilk kurulum maliyeti açısından da avantajlıdır.

Türkiye’de durum

Türkiye’nin 30 Nisan 2016 itibariyle toplam kurulu gücü 74.626 MW değerine ulaşmıştır. Elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı % 33.8’i doğalgaz, % 26’sı hidrolik baraj, % 13.2’si linyit ve taşkömürü, % 9.1’i akarsu, % 8.1’i ithal kömür, % 6.2’si rüzgâr, % 1.5’i petrol kökenli yakıtlar, % 0.9’u jeotermal, %0.5’i güneş, yine % 0.5’i ise biyogazdan karşılanmaktadır. [5]

Türkiye’nin elektrik ihtiyacı hızla artmakta olup fosil yakıt enerjisi azaldıkça, gelecek yıllarda, enerji kıtlığı, enerji fiyatlarında belirgin artış ve enerji güvensizliği ile karşılaşılma olasılığı artmaktadır. Ülkemiz enerji tüketimi, son 15 yılda ikiye katlanırken dışa bağımlılık önemli oranda yükselmiştir. Bu sebeplerle, enerjinin etkin kullanıldığı teknolojilere hızlı adımlarla geçiş, en az yenilenebilir enerji kaynaklarının ve teknolojilerinin geliştirilmesi kadar Türkiye’nin sürdürülebilir ekonomik gelişimi için önem taşımaktadır.



Şekil 1.4. Türkiye’de Elektrik Üretimi (2015) [6]

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın (ETKB) açıkladığı 2013 birincil enerji verilerine göre, 2013’te birincil enerji tüketimi %0,6 geriledi, ithal kaynakların oranı 2012’de %71,5

iken, 2013'te %73,5'a yükseldi. 2013'te yerli kaynakların birincil enerji tüketimindeki payı %26,5 oldu [7].

Birleşik ısı-güç üretimi teknolojisi Dünyada yaklaşık 100 yıldan beri uygulandığı halde, Ülkemizde, 85/9799 sayılı Kararnameye göre kurulan Otoprodüktör Tesisleriyle başlamıştır. Otoprodüktörlük, özel sektörün kendi fabrikasının elektrik ihtiyacını karşılamasına yetki ve imkân veren sistemin adıdır.

Ülkemizde enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılmasına yönelik yapılan yasal düzenlemeler çerçevesinde, gerçek veya tüzelkişilere kendi enerjilerini üretebilme hakkı tanınmıştır. Kendi enerjilerini üretme hakkına sahip gerçek veya tüzelkişiler, bu kapsamda herhangi bir lisans alma veya farklı bir şirket kurma yükümlülüğünden muaf tutulmuşlardır.

Ayrıca yürürlükte olan Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği'nin 22.Maddesi uyarınca; Yeni yapılacak olan ve yirmi bin metrekarenin üzerinde olan binalarda ısıtma, soğutma, havalandırma, sıcak su, elektrik ve aydınlatma enerjisi ihtiyaçlarının tamamen veya kısmen karşılanması amacıyla, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı yanında kojenerasyon gibi sistem çözümleri, projelendirme aşamasında analiz edilmelidir. Ayrıca yönetmeliğe göre söz konusu sistemlerin uygulanması binanın toplam maliyetinin %10'una karşılık gelecek şekilde zorunlu kılınmıştır [8].

Birleşik elektrik ve ısı üretim sistemlerinin en büyük özelliği, tesisin, ısı ve elektrik tüketim merkezlerine yakın kurulması dolayısıyla, enerji nakil hatlarına ihtiyaç göstermediği için hat kayıplarını ortadan kaldırmasıdır. Türkiye'de kayıp/kaçak oranının %20 gibi çok yüksek seviyelerde olması, bu oranı sıfıra indiren Kojenerasyon Teknolojilerinin önemini daha da arttırmaktadır. Türkiye'de kojenerasyon tesisleri elektrik üretiminin yaklaşık % 18'ini karşılamaktadır.

Avrupa Birliği ülkelerinde kojenerasyon

Avrupa Birliği resmi politikaları, enerji sektöründe etkin ve temiz teknolojilerin kullanımını desteklemektedir. Dağıtık enerji üretimi, kojenerasyon/trijenerasyon ve yenilenebilir kaynaklar, bu teknolojiler arasında yer alırken ileri bir adım olarak, mikro

şebekeler ve enerji depolama sistemleri de bu teknolojiler arasında kendilerine yer bulmaktadırlar. Avrupa'da Kojenerasyon Sistemleri, özellikle şehirlerin ısı ve elektrik ihtiyacının tek merkezden karşılanması şeklinde başlamış, yani ısı, ihtiyaç kadar üretilirken, yan ürün olarak ortaya çıkan elektrikle de konutların elektrik ihtiyacı karşılanmıştır. Böylece Toplu Konutlar, uydu kentler gibi, şebekeye bağımlı olmadan, kendi elektrik, ısı ve soğutma enerjisini sağlayan yerleşim merkezleri olmuşlardır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA - International Energy Agency), dağıtılmış elektrik üretiminde 2000 ila 2030 yılları arasında yıllık artışın %4.2 olacağını ve 2030 yılında bu üretim miktarının 35 GW'a ulaşacağını öngörmektedir [9].

Enerji tasarrufu konusunda Avrupa Birliği kojenerasyon teknolojisine oldukça önem vermektedir. Avrupa 2020 yılına kadar enerji verimliliğini %20 oranında artırmayı hedeflemektedir. Birleşik ısı güç sistemleri; elektrik, ısıtma ve soğutma enerjilerinin eşzamanlı elde edilebildiği en etkin yol olduğundan AB ülkeleri, kojenerasyonun Avrupa ve Dünya çapında yaygın kullanımının önündeki engelleri kaldırmak amacıyla COGEN Europe (European Association for the Promotion of Cogeneration) adı altında bir birlik kurmuşlardır.

Bu birlik, Avrupa' da sürdürülebilir bir enerji geleceği için kojenerasyonun geniş kullanımını sağlamayı prensip edinen ve kojenerasyonun desteklenmesi için kurulmuş bir birliktir. COGEN Europe ağı tüm Avrupa Birliğinin yanı sıra Japonya, Avustralya ve Amerika Birleşik Devletlerini de içine almaktadır.

Çizelge 1.1. AB ülkeleri arasında birleşik ısı-güç üretiminin toplam elektrik üretimi içindeki payı [10]

	Toplam Elektrik Üretiminde Kojenerasyonun Payı (%)			
	2013	2012	2011	2010
Avrupa Birliği (AB-28)	11,7	11,7	11,2	11,7
Belçika	15,2	15,6	16,0	16,0
Bulgaristan	8,5	5,9	6,7	8,0
Çek Cumhuriyeti	13,7	13,1	12,8	14,2
Danimarka	50,6	48,8	46,2	49,2
Almanya	12,4	12,6	13,1	13,
Estonya	9,3	9,7	10,4	10,3
İrlanda	7,8	7,6	7,1	6,7
Yunanistan	3,4	3,9	4,5	4,3
İspanya	8,5	8,9	7,6	7,4
Fransa	2,4	2,7	2,8	2,8
Hırvatistan	12,6	19,9	20,4	14,3
İtalya	12,7	12,0	11,5	11,5
Kıbrıs	1,4	0,6	0,9	1,0
Letonya	38,3	34,1	47,4	45,0
Litvanya	35,0	36,1	37,5	34,6
Lüksemburg	14,7	11,7	12,1	9,6
Macaristan	12,8	13,4	16,6	19,6
Malta	0,0	0,0	0,0	0,0
Hollanda	34,5	33,7	32,5	33,2
Avusturya	14,4	14,4	15,7	15,4
Polonya	15,9	16,7	16,6	17,6
Portekiz	13,8	13,9	12,7	11,8
Romanya	11,2	11,4	11,7	10,8
Slovenya	7,1	7,5	7,1	6,9
Slovakya	77,0	78,6	24,5	15,9
Finlandiya	34,1	34,5	36,2	36,2
İsveç	10,2	9,6	10,0	12,5
Birleşik Krallık	5,5	6,0	6,3	6,2

AB elektrik talebinin yaklaşık %15'ine kojenerasyon teknolojileri cevap verirken önümüzdeki yıllarda bu oran daha da artacaktır. Kojenerasyon sistemlerinin kullanımı Avrupa şehirlerinde oldukça yaygındır. Bölgesel enerji sistemleri en çok Kuzey Avrupa ülkelerinde kullanılmaktadır. (bkz. Şekil 1.4.) Örneğin İsveç'te ısınma ihtiyacının yarısından fazlası bölgesel ısınma tesisleri ile karşılanırken yine Avrupa'nın önemli şehirlerinden Stockholm, Helsinki ve Kopenhag'da da elektrik ve ısıtma ihtiyacının hatırı sayılır bir kısmı bu sistemlerle karşılanmaktadır.



Şekil 1.5. Avrupa’da kojenerasyon kullanımı (2004) [1]

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Dağıtık Enerji Sistemleri için Literatür Araştırması

Bileşik ısı-güç üretimi ya da diğer adıyla kojenerasyon ve üçlü üretim (trijenerasyon) teknolojileri, yenilenebilir enerji üretim tesisleri, termal ve elektrik depolama sistemleri ve içeren Dağıtık Enerji Kaynaklarından (DEK) oluşan sistemlerin optimal tasarım ve işletimi üzerine pek çok çalışmalar yapılmıştır.

Enerji arz sistemlerinin tasarım ve entegrasyonunda geleneksel olarak iki yaklaşım mevcuttur:

1. Termodinamik programlama
2. Matematiksel programlama

Termodinamik analiz, termo-ekonomik analiz ve CHCP sistemlerin termal entegrasyonunu ele alırken enerji kaybının en küçüklenmesini amaçlar. Genel olarak termodinamik metotlarla enerji etkin sistemlerin tasarımı amaçlanır. Ancak bu metotlar farklı problem sınıflarının çözümü için genel bir yapı oluşturmazlar. Bu nedenle 1980'lerden bu yana endüstride tasarım ve planlama amacıyla matematiksel programlama kullanılmaktadır. Matematiksel programlama ile süreç parametreleri ve yapısındaki değişimleri mantıksal kısıtlarla birlikte içeren maliyet etkin çözümlere ulaşmak daha kolaydır.

Elektrik, ısıtma ve soğutma enerjilerinin üretimi için mevcut teknolojilerin çokluğu ve bu teknolojilerin farklı entegrasyonlarının olması, en uygun konfigürasyonun seçimini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, enerji talebindeki yüksek değişkenlik de en uygun işletim stratejisinin seçimini de zorlaştırmaktadır [11]. Bölgesel ısıtma-soğutma ağının (DHCN – District Heating/Cooling Network) da dahil edilmesiyle problemin karmaşıklık düzeyi daha da artmaktadır.

Bu tip modellerde çok sayıda değişken içermesi ve karmaşıklığı nedeniyle çözüm yöntemi olarak Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP - Mixed Integer Linear Programming) modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Connolly ve diğerleri [12], literatürdeki DEK sistem planlama modellerini,

1. Simülasyon modelleri; üretim sistemlerinin performans değerlendirmesi
2. Senaryo modelleri; uzun dönemli sistem değişimlerinin incelenmesi
3. Denge modelleri; çoğunlukla ulusal anlamda enerji arz- talep hesaplamaları
4. Optimizasyon modelleri; sistemin optimal konfigürasyonunun belirlenmesi

şeklinde dört gruba ayırırken Wouters ve arkadaşları [13] ise iki ana sınıfa ayırmışlardır. Birincisi sistemin ayrıntılı elektriksel veya termodinamik özellikleri üzerinde yoğunlaşan modellerdir. İkincisi ise termal ve elektrik tüm enerji entegrasyonun yanı sıra enerji akışını da optimize eden üstyapı (superstructure) modellerdir.

Üstyapı modelleri de iki grupta incelenebilir. Birincisi Bölgesel Isıtma/Soğutma Ağı ve enerji üretim teknolojilerinin termal entegrasyonu üzerinde yoğunlaşırken [11,14] ikinci grup ise hem termal hem elektriksel entegrasyonu [15-17] kapsamaktadır.

DEK sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, çoğunlukla oluşturulacak sistemin alternatifler arasından optimal konfigürasyonunun ve/veya optimal yatırım boyutunun belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Daha ayrıntılı teknik analiz içeren çalışmalarda ise dağıtık elektrik jeneratörlerinin -güç kaybı ve sistem güvenilirliği vb. teknik özellikleri dikkate alınarak elektrik şebekesi içerisindeki en uygun lokasyonlarının belirlenmesi ya da dağıtık enerji kaynaklarından oluşan sistemlerin çevresel niteliklerinin değerlendirilmesi ön plana çıkmıştır. Bölgesel ısıtma sistemlerinin incelendiği çalışmaların ise çoğunlukla enerji dönüşüm teknolojilerinin optimizasyonu ve işletim stratejileri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir.

Yapılan çeşitli çalışmalardan bazılarına kısaca değinmek gerekirse;

Silveira ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada üniversite yerleşkesi için kojenerasyon sisteminin termo-ekonomik analizini yapmışlardır. Kampus olarak California, USA San Diego Eyalet Üniversitesi seçilmiştir. Üniversite yılın her günü yirmi dört saat çalışmaktadır. İhtiyaç duyduğu elektrik ve doğalgazı San Diego Gaz ve Elektrik biriminden kullanım suyunu ise San Diego Belediyesinden satın almaktadır. Yerleşkenin elektrik ihtiyacı 9 MW olup tasarlanan kojenerasyon sistemi ile bu değerin yaklaşık 1/3'ü sağlanmaktadır. Üzerinde yapılan çalışmalarla sistemin ekonomik ömrü, 10 yıl olarak bulunmuştur [18].

Silveira ve Tuna, araştırmalarında birleşik ısı-güç sistemlerinin optimizasyonu için termo-ekonomik analiz yöntemi uygulamışlardır. Bu yöntemin amacı termodinamiğin ikinci yasasına bağlı olarak minimum ekserji üretim maliyetinin modelini çıkartmaktır. Optimizasyon için seçilen değişkenler; kazandan buhar türbinine gelen buharın sıcaklık - basınç değerleri, basınç oranı, gaz türbini egzoz sıcaklığı ve gazın debisidir. Enerji dönüşüm işlemlerinde enerji maliyeti hesaplanmıştır. Bu hesaplar ve çıkarılan denklemler fizibilite çalışmalarında kullanılmaktadır. Ekserji üretim maliyeti kojenerasyon sistemlerinin ekonomik analizi için yeni bir yöntemdir. Bu yöntemde enerji üretiminin optimum maliyeti hesaplanmaktadır [19].

Cormio ve diğerleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını içeren bir bottom-up enerji sistem optimizasyon modeli geliştirmişler ve bu modelle evre dostu teknolojileri EFOM modeline uyarlamışlardır [20].

Çoklu enerji üretimi uygulamalarının bazılarında bahsetmek gerekirse; Tayland'da kurulmuş bir tesiste, absorpsiyonlu sistem ile soğutmada, kojenerasyon sisteminden elde edilen sıcak su ya da buhar ile gereksinim duyulan soğutma sağlanabilmektedir. Almanya'da kurulan bir tesiste, kojenerasyon sisteminden elektrik enerjisi üretilirken geri kazanım yoluyla elde edilen ısı enerjisinden yararlanarak sıcak hava üretilmiş ve mevcut tesisin ihtiyacı olan kurutma havası sağlanmıştır.

Finlandiya'da, bir ekmek fırınında kurulmuş kojenerasyon tesisinde üretilen elektrik enerjisinin dışında fırının gereksinim duyduğu buhar, düşük ve yüksek basınçlı olarak sağlanmaktadır. Aynı zamanda buhar sisteminin geri kazanımından sağlanan ısı enerjisi, eşanjörler yardımıyla merkezi ısıtma amaçlı sıcak suya dönüşmektedir. Danimarka'da kurulmuş olan tesiste, yine elektrik üretilirken aynı zamanda geri kazanılan ısı enerjisi ile sera ısıtması yapılmaktadır. Hollanda'da yapılan bir kojenerasyon tesisi çöp atıkların birikmesi sonucu oluşan metan gazı kullanılması ile çalışmaktadır. Bu tesiste, çöplük gazlarının emisyon yoluyla çevreye zarar vermesini ve metan patlamalarını engellemek için elektrik üretimi sağlanmaktadır [21].

Kıncay ve Yumurtacı, Yıldız Teknik Üniversitesi Davut Paşa kampusunu baz almak sureti ile bir üniversite kampusu için en uygun kojenerasyon sisteminin ekonomik analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada kurulacak kojenerasyon tesisinin toplam geliri yıllık

1.884.171,4 \$ giderleri ise 1.310.499,3 \$ olarak geri ödeme süresi ise 1.25 yıl olarak hesaplanmıştır. İkili yaptıkları çalışmanın sonucunda kojenerasyon sistemlerinin maliyetinin belirlenmesinde en önemli faktörün doğalgazın fiyatları olduğunu savunmuşlardır. Doğalgazın birim fiyatının değişimine göre ve Türkiye gibi doğalgaz ithal eden ülkelerde dövizin kuruna bağlı olarak sistem maliyetlerinin de değişeceğini, bunun neticesi olarak da amortisman sürelerinin değişeceğini belirtmişlerdir. Bir kojenerasyon tesisi tasarımı yapılırken ön çalışmaların iyi yapılması gerektiğini ve ihtiyaçların iyi belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda kojenerasyon tesislerinin bu gibi kuruluşlar için cazip, uygun ve karlı sistemler olduğunu belirtmişlerdir [22].

Liu ve diğerleri, 2010-2035 yılları arasında Çin için metanol ve elektrik üretimini eşzamanlı yapan bir çok enerjili üretim sisteminin planlanmasında kapasite artırımını göz önünde bulunduran, amaç fonksiyonu Net Bugünkü Değerin minimizasyonu olan bir MILP model geliştirmişlerdir [23].

Obara, DEK sistemleri için ekipman atama ve yakıt pillerinin atık ısılarından faydalanan sıcak su boru hattı tasarımı yaptığı çalışmasında; kurulum, işletim ekipman maliyetlerini en küçüklerken Genetik Algoritma kullanmıştır [24].

Weber ve diğerleri, mahalli enerji gereksinimlerini karşılayabilecek ağ tasarımı ve beraberinde teknoloji tasarımını birleştiren bir hiyerarşik çözüm planı geliştirmişlerdir [25].

Arteconi ve diğerleri, trijenerasyon sistemlerinin süpermarketler için uygulamasında farklı teknoloji alternatiflerinin uygunluğunu ve sistemden maksimum faydanın sağlanabilmesi için fotovoltaiik sistemlerle entegrasyonunu da irdelemişlerdir. Yatırımın geri dönüşüm süresini on yıl olarak bulmuşlar ve bu entegrasyonun mevcut şartlar altında ekonomik olmadığı sonucuna ulaşmışlardır [26].

Chicco ve Mancarella, trijenerasyon sistemlerdeki çoklu enerji akışını matrislerle gösteren yeni bir yaklaşım geliştirmişler ve bu matris formu ile sistemin işletim optimizasyonu için amaç fonksiyonu ve seçilen çözüm metodundan bağımsız olarak etkin bir yapı oluşturmuşlardır [27].

Cai ve diğerkleri, bölgesel enerji yönetim sisteminin uzun dönemli planlanmasında çoklu belirsizlikler altında (aralıklar, olasılık dağılımları, vb.) Bulanık Rassal Aralık Programlama (FRIP) modeli ile optimal stratejiyi belirlemeyi amaçlamışlardır [28].

Cai ve diğerkleri, belirsizlik altında enerji kaynaklarının maliyet etkin atanması amacıyla interaktif entegre bir karar destek sistemi (UREM-IDSS) geliştirmişler ve belirsizlikleri kesikli aralıklarla ifade etmişlerdir [29].

Wang ve diğerkleri, binalarda ısıtma, soğutma ve güç sistemlerinin optimal konfigürasyonlarını belirlerken Genetik Algoritma kullanmışlar ve BCHP sistemler ile konvensiyonel sistemleri çevresel etkileri (küresel ısınmaya katkısı, asitleşme ve ozon tabakasını delme potansiyeli) yönünden karşılaştırmışlardır. Örnek uygulamayı ise beş yıldızlı bir otelde yapmışlardır [30].

Lozano ve diğerkleri, bütünleşik ısıtma soğutma güç sistemlerinde termal enerjinin depolandığı bir MILP model geliştirmişler ve İspanya'da 5000 apartmanlık bir yerleşke için yasal kısıtlamaların sistem üzerindeki etkisini irdelemişlerdir [11].

Kavvadias ve diğerkleri, trijenerasyon sistemlerin tasarımında optimal strateji ve optimal yatırım boyutunun belirlenebildiği, ekonomik etkinlik ve performans kriterlerini dikkate alan, parametrik bir analiz çalışması yapmışlar ve çalışmanın uygulamasını bir hastane için gerçekleştirmişlerdir [31].

Ren ve Gao, dağıtık enerji sistemlerinde optimal sistem kombinasyonu ve operasyon stratejilerinin belirlenmesi ve bu sistemlerin ekonomik, enerjetik ve çevresel açıdan değerlendirilmesi amacıyla genel bir MILP modeli kurmuşlar ve farklı senaryo analizleri üzerinden değerlendirmeler yapmışlardır [15].

Khalesi ve diğerkleri, farklı yük seviyelerini göz önünde bulundurarak dağıtık jeneratörlerin dağıtım ağı içerisindeki optimum lokasyonlarının belirlenmesinde güç kaybının minimizasyonu, güvenilirlik artışı ve DG maliyetlerinin değerlendirilmesi sonucu maksimum faydanın elde edilmesini amacıyla Dinamik Programlama uygulamışlardır [32].

Carvalho ve diğerleri, İspanya'nın farklı coğrafik lokasyonlarında kurulacak trijenerasyon sistemlerin optimal konfigürasyonları belirlenirken çevreye verdikleri zararın ve yatırım maliyetinin minimizasyonu amaçlanmıştır. Sonuç olarak farklı coğrafik koşullarda optimal konfigürasyonların da farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır [33].

Weber ve Shah, Güney İngiltere'de 6500 nüfuslu 350 hektar alan üzerine kurulu bir eko-kentte bir bölgesel enerji sistemi için farklı enerji arz teknolojilerinin birlikte kullanımına izin veren tek seviyeli bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Bu alanı farklı enerji ihtiyaçlarına göre bölgelere ayırmışlardır. CO₂ emisyonlarını düşürecek optimal teknoloji birleşimini bulmak için DESDOP modelini geliştirmişlerdir. Bu çalışmada ısı kaybı ortalama %5 olarak alınmıştır [34].

Ortiga ve diğerleri, İspanya'da PolyCity projesi kapsamında 1.890.000 (189 hektar) metrekare alan üzerine kurulu Alba Park'ta kullanılan bir polijenerasyon tesisinde farklı senaryolar üzerinde sistem etkinliği, yatırım maliyeti, yatırımın geri dönüş süresi ve CO₂ emisyonunu irdeleyen farklı senaryo analizleri yapmışlardır. Bu sistemde üretilen sıcak ve soğuk enerjinin bölgesel ısıtma soğutma ağı ile yerleşkenin farklı bölgelerine taşınması da mümkündür [35].

Carvalho ve diğerleri, bir hastane için kurulacak trijenerasyon sistemin optimal konfigürasyonunu belirlerken çok amaçlı optimizasyon uygulamışlar ve Pareto analizi ile amaç fonksiyonlarını birbirlerine göre önceliklendirmişlerdir [36].

Mehleri ve diğerleri, 2012'deki çalışmalarında [16] ısıtma boru hattı dahil olan mahalli ölçekte mikro şebekeli entegre bir DEK sisteminin genel tasarım ve işleyişi ele alınmıştır. Aynı zamanda sistemin ek aday bileşenleri olarak fazla ısının etkin kullanımı amacıyla termal yedekleme kazanları, fotovoltaiik (PV) diziler ve farklı boyutlarda mikro bileşik ısı-güç jeneratörlerini de dikkate alan bir model ile alternatifler arasından optimal seçim ve atama yapılmış ayrıca ısıtma boru hattının optimal rotası ve üretim birimlerinin kapasiteleri de belirlenmiştir. Sonuç olarak tüm sistemin yatırım ve işletim maliyetlerinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Mehleri ve diğerleri, 2013'deki çalışmalarında [17] ise kurdukları matematiksel model ile DEK sistem alternatifleri olarak fotovoltaiik ve kojenerasyon sistemlerin kapasiteleri,

işletim programları ve ısıtma boru hattının optimal tasarımını maliyet minimizasyonu temelinde belirlemişlerdir. Ayrıca termal depolama tankları da fazla ısıyı depolamak amacıyla modele ilave edilmiştir. Konutlar arası elektrik transferi ise mevcut güç iletim ağına bağlı mikro şebeke ile sağlanmıştır. Çevresel etkinin değerlendirilmesi için de karbon emisyonu, ilave bir maliyet kalemi olarak modele dahil edilmiştir.

Problem girdileri arasında konutlar arası mesafelerde dikkate alınmıştır. Atina'daki örnek uygulamada aralarındaki mesafe 100 metreyi geçmeyen beş adet bina için uygulama yaparken 2012'deki çalışmalarında 7.000 m² alan üzerinde on adet bina ve 17.000 m² alan üzerinde 20 adet bina için modeli farklı senaryolar altında modeli incelemişlerdir.

Modelin çıktıları arasında ise; DEKlerin ve depolama tanklarının kapasiteleri, DEKlerin talep noktalarına atama durumları, yerleşkeler arası ısıtma boru hattının ağ yapısı, 24 saatlik ortalama enerji üretim profilleri, 24 saatlik ortalama ısı transfer miktarı ve elektrik akışı sayılabilir. Yine bu çalışmada konutlar arası mesafenin az olması dolayısıyla transfer sırasındaki termal kayıplar dikkate alınmamış, yalnızca elektrik için %1'lik bir iletim-dağıtım kaybı göz önünde bulundurulmuştur.

İncelenen senaryo karşılaştırmaları sonucunda tüm binalara azami 10 kWlık fotovoltaiik birimlerin kurulduğu, ayrıca artan ihtiyacın karşılanması için bir birleşik ısı-güç biriminin de kurulduğu üç numaralı senaryo ile konvansiyonel sisteme nazaran toplam maliyette yaklaşık %90'lık bir düşüş öngörülmüştür. Bu derece yüksek bir ekonomik faydanın sağlanmasının sebebi ise Yunan Hükümetinin fotovoltaiik üretimden elde edilen elektriğin gerilim fiyatının çok yüksek olmasıdır.

Bracco ve diğerleri, kentsel alanda binaların ısı dağıtım ağı ile bağlandığı bir CHP sisteminin tasarım ve işletiminin optimizasyonu için bir MILP modeli geliştirmiştir; Bu çalışmada hem yıllık maliyetlerin hem de CO₂ emisyonlarının en küçüklenmesi amaçlanmaktadır [37].

Omu ve diğerleri, optimal DEK sistem tasarımı için geliştirdikleri DENO (Distributed Energy Network Optimisation) Dağıtık Enerji Ağı Optimizasyon Modeli ile termal dağıtım ağ yapısını geliştirerek, üretim birimlerinin optimal lokasyonları ile optimal dağıtım ağ yapısı ve dağıtım miktarlarını belirlemişlerdir.

Bu çalışmada oluşturulan DENO model ile enerji üretim birimlerinin yerleşimi, dağıtım ağının yapısı ve dağıtım miktarları belirlenmektedir. Bu çalışmada çok sayıda teknoloji seçeneği (kojenerasyon birimi, ısı pompaları, rüzgâr tribünleri, solar kolektörler, fotovoltaik ve kazanlar) ve iki tip yakıt seçeneği (doğalgaz ve biokütle) bulunmasının yanı sıra teknoloji kurulumunda sayı ve yer sınırı konulmamıştır. Modelin genel amacı, üretim noktalarının en uygun yerlerini ve optimum özelliklerini belirlerken toplam yıllık maliyetin en küçüklenmesi olarak ele alınmıştır. Bu modelde emisyon oranları kısıt olarak ele alınmış, amaç fonksiyonuna eklenmemiştir. Enerji talep verileri saatlik bazda alınmış, model sonuçları Zaman Serileri kullanılarak değerlendirilmiştir [38].

Wouters ve diğerleri, konutsal bir alanda DEK planlaması için deterministik bir MILP modeli önermişlerdir. Mikro şebeke işletimi, ısıtma-soğutma entegrasyonu ve farklı DEK alternatifleri ve depolama birimlerini de içine alan bütünleşik bir yaklaşım sunmuşlardır [13].

Geliştirilen MILP model ile Güney Avustralya’da örnek alınan 5 adet bina için yıllık planlama periyodunda, 24 saatlik aralıklarla girilen veriler kullanılarak tüm talebi karşılayacak DEK sisteminin optimal tasarımı, dağıtım çizelgesi ve yıllık toplam maliyeti bulunmuştur. Modelin girdileri arasında iklimsel veriler, (saatlik güneş ışıınımı, rüzgarın hızı, vb.) sistem bileşenlerinin teknik özellikleri, sermaye ve işletim maliyetleri, enerji tarifeleri, ülkelere özgü kanun düzenlemeleri (devlet destekleri, karbon salınım vergisi, vb.), saatlik ortalama enerji talepleri gibi veriler bulunmaktadır. Bahsedilen bu örnekte yerleşkeler arası mesafe değerleri Referans [17]’deki değerler alınmıştır.

Yang ve diğerleri, tüm DEK sisteminin (enerji dağıtım ağının yapısı, ekipmanların yer seçimi, sayısı, kapasitesi, tipinin belirlenmesi) eşzamanlı konfigürasyon ve işletim optimizasyonunu amaçlayan bir MILP model kurmuşlardır. Bu çalışmada geleneksel enerji üretim teknolojilerine ek olarak fotovoltaik ve rüzgar enerjileri de lokal üretim teknolojilerine dahil edilmiş ayrıca soğuk ve sıcak enerji depoları ve bölgesel enerji dağıtım ağları da bu model de dikkate alınmıştır. Modeli uygulamak üzere kentsel alanda, Çin’in Guangzhou kentinde dört adet binayı (hastane, otel, konut ve AVM) örnek olarak ele almışlardır. Örnekte aday ekipmanların (gaz türbini, rüzgâr türbini, fotovoltaik, atık ısı kazanı, ısı tankı, soğutucular, soğuk kazanı vb.) kapasiteleri, etkinlikleri, yatırım

maliyetleri, birim sabit ve değişken işletim/bakım maliyetleri ve ekonomik ömürleri gibi teknik özellikleri de dikkate alınmıştır.

Beş farklı senaryo üzerinde etki ölçümü yapılmıştır. DEK sisteminin olmadığı geleneksel enerji temin sistemi temel alınarak, dağıtım ağı ve enerji depolaması olmayan DEK sistemi, dağıtım ağı olan ancak depolama sistemi olmayan DEK sistemi, depolama sistemi olan dağıtım ağı olmayan DEK sistemi ve hepsinin bir arada olduğu DEK sistemi olmak üzere beş farklı senaryo altında model çalıştırılmıştır. Bu şartlar altında optimal sistem konfigürasyonu ve işletim stratejileri belirlenmiştir.

Sonuç olarak DEK sistem kullanımının, geleneksel sistemle kıyaslandığında %20-25 arasında yıllık maliyetlerde azalma sağladığı ve üç yıl içerisinde sistemin kendini ödeyebildiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca dağıtım ağı ve depolama sistemlerinin kullanımının da atık ısının tamamının kullanılmasını sağlayarak sistem etkinliğini arttırdığı görülmüştür. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin, ekonomik açıdan fosil kaynaklı enerji teknolojileri kadar etkin olmadığı sonucuna da ulaşılmıştır [39].

Yang ve diğerleri, yukarıda bahsedilen modele benzer bir çalışma ile dağıtık enerji kaynaklarını bölgesel ölçekli (district-scale) olarak ele almışlardır. Bu durumda enerji, enerjiyi tüketen binalar dışında üretilerek ve enerji dağıtım ağları aracılığıyla talep noktalarına ulaştırılmaktadır. Bu sistem içerisindeki DEK'lerin optimal tasarım ve işletimi için jenerik ve esnek bir MILP modeli geliştirmişlerdir. Bu modelin uygulamasını da aynı bölgede iki aday termal güç tesisi, 3 enerji dağıtım istasyonu ve hastane, otel, alışveriş merkezi, ofis binası ve çalışmada tek bina olarak sayılan birkaç apartmandan oluşan bir konut kompleksi olmak üzere toplam 5 binanın bulunduğu yaklaşık 300 hektarlık bir alan için örneklendirmişlerdir. Enerji kayıplarının dikkate alınmadığı modelde sonuç olarak geleneksel sistemle karşılaştırıldığında bölgesel ölçekli DEK sisteminin toplam yıllık maliyetlerde %14.1'lik bir azalma sağladığı görülmüştür [40].

Bracco ve diğerleri, mahalli düzeyde ısıtma, soğutma ve elektrik ihtiyacını karşılayan bir DEK sisteminin tasarım ve işletiminin optimizasyonu için MILP ile DESOD modelini geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın ana katkısı, DESOD' un esnekliği ile farklı alternatifler içeren kapsamlı bir DEK sistemi için çok genel bir matematiksel model teşkil etmesidir. DESOD'un çıktıları olarak, ısıtma boru hattının yerleşimi, her bir binada kurulacak arz

teknolojileri, bu teknolojilerin boyutları, saatlik yük profilleri ve mikro şebeke ile ulusal şebeke arası elektrik enerjisi alışveriş miktarları sayılabilir. Modelin uygulamasını, Kuzey İtalya'da, Savona'da 25.000 metrekare alan içinde 3-4 katlı 11 adet bina için yapmışlardır [41].

Ameri ve Besharati, sistem birleşenlerinin optimal konfigürasyonunu ve işletim çizelgelerini belirleyen ayrıca ısıtma-soğutma ağı için optimal rotayı tasarlayan bir model geliştirmişlerdir. Tahran'da 137 adet binayı kapsayan 50 hektarlık bir yerleşim alanında önceden belirlenmiş 7 noktada kurulacak DEK sistemlerinin optimal tasarımını farklı senaryolar altında incelemişlerdir. Kurulan modelin amacı, bölgesel ısıtma-soğutma ağı dahil olarak tüm sistem için toplam yatırım ve işletim maliyetlerinin en küçüklenmesidir. Bu çalışmada, boru hattındaki termal kayıp km başına % 15, soğuk enerji için ise % 5 alınmıştır.

Uygulama sonucunda; trijenerasyonun BISA ile birlikte kullanılmasının basit kojenerasyon sistemlere nazaran daha ekonomik ve çevre dostu olduğu görülmüştür. En düşük maliyetli sistemin ise fotovoltaik, trijenerasyon ve BISA birleşimi ile elde edildiği görülmüştür.

Konvansiyonel sisteme nazaran bu sistemin %40.8'lik bir enerji maliyeti düşüşüne ve %38.7'lik enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür. Ayrıca yine bu sistemin %35.8'lik bir emisyon azalmasına sebep olduğu görülmüştür [42].

DEK sistemlerinden maksimum faydanın sağlanabilmesi için üretim birimlerinin optimal yerleşimi ve üretim teknolojilerinin optimal birleşimi çok önemlidir.

Bu tez çalışmasında ise ayrıntılı teknik analizlere inilmeden, endüstri mühendisliği bakış açısıyla, yüksek enerji etkinliğine sahip dağıtık enerji üretim tesislerinin mevcut talepleri karşılama temeline dayalı tesis yeri seçimi problemi ele alınmaktadır. Bu çalışmadaki DEKlerin enerjiyi tüketen binalar dışında konumlandırıldığı ve üretilen enerjinin enerji dağıtım ağları aracılığıyla talep noktalarına ulaştırıldığı varsayılmaktadır. Kısaca belirtmek gerekirse; Bölgesel Isıtma/Soğutma Ağlarının da dahil edildiği bölge ölçekli (district-scale) [40] lokal enerji üretim sistemlerinin tasarım ve planlaması ele alınmıştır. Son kullanıcıların enerji talepleri karşılanırken öncelikle, tesis ile kullanıcı arasındaki mesafe göz önünde bulundurulmuş ve model kapsama mesafesi temelinde kurulmuştur.

Yapılan incelemeler ışığında Bölgesel Isıtma Soğutma Ağlarının kurulum maliyetleri, bölgesel enerji sistem maliyetlerinin neredeyse yarısını oluşturmaktadır [43]. Kurulan model ile toplam maliyetin en küçüklenmesi amaçlanırken dağıtım ağının maliyeti modele taşıma maliyeti olarak ilave edilmiştir. Modelin çıktısı olarak son kullanıcının talep türüne göre hangi tesise atandığı bilgisi ile birlikte kurulacak dağıtım ağının yapısı, açılacak tesis sayısı ve tesis tipi (kojenerasyon/trijenerasyon) ve tesis boyutu belirlenmektedir.

2.2. Tesis Yer Seçimi Problemleri için Literatür Araştırması

2.2.1. Tesis yer seçimi problemlerinin sınıflandırılması

Tesis yer seçimi problemleri, birçok gerçek hayat uygulaması içeren, uzun dönemli stratejik kararlardır. Bu problem tipinde zaman ve maliyet, alınacak kararı etkileyen en önemli faktörlerdir.

Daskin, yer seçimi modellerini dört sınıfa ayırır [44].

- Analitik modeller
- Sürekli modeller
- Şebeke modelleri
- Kesikli modeller

Analitik modeller, en basitleridir. Analitik modellerde, talep dağılımının sürekli bir şekilde dağıldığı (düzgün, üssel, vb.) olduğu ve tesislerin belirlenen alanda herhangi bir noktaya yerleştirilebileceği varsayılırken; sürekli modellerde talebin ayrık noktalarda ortaya çıktığı varsayımı vardır. Klasik Weber problemi, bu sınıfın tipik bir örneğidir. Şebeke modellerinde ise talep ve tesis noktaları ancak düğüm ve bağlantılardan oluşan ağlar üzerinde olmalıdır. Kesikli yer seçimi modellerine gelince, talebin düğümlerde olduğu ve açılacak tesislerin belirli bir sayı ile sınırlı olduğu varsayılır.

Kesikli modeller de aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

Kesikli Modeller

Kaplama temelli modeller

- Küme Kaplama: Tüm talepleri karşılayacak tesis sayısının en küçüklenmesi
- Maksimum Kaplama: P sayıda tesis ile kapsanacak alanın en büyüklenmesi
- P-Merkez: P sayıda tesis ile tüm taleplerin karşılanacağı kapsama mesafesinin en küçüklenmesi

Medyan temelli modeller

- P-Medyan: Talep noktaları ile en yakın tesisler arası mesafenin ortalamasının en küçüklenmesi
- Sabit Maliyet (Fixed Charge): Sabit tesis ve taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi

Diğer modeller

- P-Dağıtım: Herhangi iki tesis arasındaki en küçük mesafenin en büyüklenmesi

Kaplama temelli modellerde taleplerin kapsanabilmesi için kritik bir mesafe veya zaman dahilinde olması gerektiği varsayımı vardır. Medyan temelli modellerde ise talep noktası ile o noktanın atanacağı tesis arasındaki talep ağırlıklı ortalama mesafenin en küçüklenmesi amaçlanır. Bu modeller, taşıma maliyetlerinin kullanıldığı dağıtım planlarında kullanılır. Kaplama modelleri, mesafeleri genellikle 0-1 değişken gibi ele alıp, yalnızca bir düğümün kapsanıp kapsanmadığıyla ilgilenirken, medyan temelli modeller gerçek mesafeleri dikkate alırlar.

Maksimum Kaplama Problemleri ve bunun çeşitli uzantıları yerleşim literatüründe önemli bir yer teşkil eder. Church ve ReVelle, (1974)'Maksimum Kaplama Problemi' ni tanıtmışlardır [45]. Megiddo, Zemel ve Hakimi, (1983), Maksimum Kaplama Problemlerini bir ağaç şebekesinde tanımlamış ve bunun için bir çözüm algoritması sunmuşlardır[46]. Daskin, Hogan ve ReVelle (1988) ise kaplama modellerinin çoklu, ek, yedek ve beklenen kaplama gibi uzantılarını incelemişlerdir [47].

Yer seçimi problemi teorisindeki problemlerden biri olarak, Maksimum Kaplama Problemleri sabit sayıdaki tesisler için belirtilen kritik bir mesafede ya da istenilen süre içinde kaplanan talep noktalarının sayısını maksimize eder. Bütün talep noktalarının kaplanması bir koşul değildir [48].

Küme kaplama problemleri (Set covering)

Küme kaplama modeli, Toregas tarafından 1971’de geliştirilmiştir [49]. I talep noktalarının, J de aday tesislerin kümesi iken $\forall i \in I$ ve $\forall j \in J$ noktaları arası uzaklık d_{ij} dir. D_c kapsama mesafesi ise $N_i = \{j \in J : d_{ij} \leq D_c\}$, N_i , i talep noktasını kapsayan tüm j tesislerinin kümesidir. X_j ; aday tesis noktası j ’de açılacaksa 1; değilse 0 değeri alacak, 0-1 değişkendir. Küme kaplama problemlerinin, havayolu mürettebat planlaması, siyasi bölgeleri paylaşma, havayolu planlaması, araç rotalaması gibi birçok uygulama alanı vardır [50].

Küme kaplama probleminde tüm talep noktalarının sonlu bir kümedeki en az bir aday tesis tarafından kaplanması amaçlanır. Bu matematiksel olarak aşağıdaki şekilde formüle edilir [51].

Amaç fonksiyonu;

$$\text{Min } \sum_{j \in J} x_j \quad (2.1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1, \quad \forall i \in I \quad (2.2)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (2.3)$$

Amaç fonksiyonu Eş. 2.1, seçilen tesis sayısının en küçüklenmesi amaçlanır. Eş. 2.2’ deki kısıtlar, her talep noktasının en az bir aday tesis tarafından kaplanmasını sağlar. Eş.2.2’ nin sol tarafı talep noktası i ’yi kaplayan tesislerin sayısını verir, burada N_i talep noktası i ’ nin talebini karşılayabilen aday tesislerin kümesidir.

Küme kaplama probleminin bir dizi zayıflıkları vardır:

- Tüm talep noktalarının kapsanması şartı, maliyetin artmasına sebep olur.
- Genellikle çok sayıda alternatif optimal sonuç vardır.
- Model, büyük talep ile küçük talep arasındaki farkı ayırt edemez.

Maksimum kaplama problemleri (Maximal covering)

Küme kaplama modeliyle ilgili sorunlardan bir tanesi de bütün talep noktalarının kaplanması için açılması gereken kadar tesis açılmayacak olmasıdır. Bunun başlıca nedeni bütçe sınırlandırmalarıdır. Dahası, küme kaplama modeli bütün talep noktalarının özdeş olduğunu varsayar. Diğer bir deyişle, yılda 10 hizmet çağrısı alan bir tesisle yılda 10.000 hizmet çağrısı alan iki talep noktası aynı derecede öneme sahiptir [51].

Bu iki sorun araştırmacıları yerleştirilecek tesis sayısını sabitlemeye ve kaplanan taleplerin sayısını (talep noktaları sayısını maksimize etmek yerine) maksimize etmeye götürmüştür. Church ve ReVelle (1974) mevcut tesis sayısının tüm bölgeleri kaplamak için gerekli tesis sayısından daha az olduğu durumları ele almak amacıyla Küme Kaplama Modelini geliştirmişlerdir. Bu yeni formülasyonda amaç, eldeki kısıtlı sayıda tesisle kaplanan talep noktalarını maksimize etmektir. Bu model Maksimum Kaplama Modeli olarak adlandırılmıştır [45].

P- merkez problemleri

Küme kaplama modelinde olduğu gibi, tüm taleplerin kaplanması gerekmektedir. Ancak P-Merkez Problemlerinde dış kaynaklı bir kaplama mesafesi kullanmak ve modelden bütün talep noktalarını kaplayan tesis sayısını minimize etmesini beklemek yerine, her talep noktasının, bir tesisten uzaklığı, içeriden tanımlı olarak kaplayacak uzunluğu minimize etmesi beklenir. Bu model P-Merkez Problemi veya Mini-Maks Problemi olarak bilinir çünkü bir talep ve bu talebe en yakın tesis arasındaki uzaklık minimize edilmektedir.

P- medyan problemleri

“P-Medyan” terimini ilk kullanan ve P-Medyan problemini ilk tanıtan Hakimi(1964)olmuştur [52]. P-Medyan Problemi, mini toplam yer seçimi problemlerinin

bir alt sınıfıdır. P-Medyan Problemleri bir şebeke üzerindeki hizmet merkezleri ile talep noktaları arasındaki toplam veya ortalama mesafeyi P sayıda hizmet noktası için minimum yapmaya çalışan bir yaklaşımdır. Örneğin bir otoyolda devriye görevi verecek olan karakolların sorumluluk sahalarının belirlenmesi bu tip bir problemdir. Olay olması en muhtemel noktalara karakol koymak sorunun çözümü için en uygun alternatiftir [53].

P-Medyan Problemlerinin amacı toplam maliyeti minimize edecek şekilde bir şebeke üzerinde P tane tesisin yerleşimini yapmaktır. i noktasındaki talebi karşılamanın maliyeti, i noktasındaki talep ile i noktası ve bu noktaya en yakın tesis arasındaki mesafenin çarpımıyla bellidir. Bu durumda, P-Medyan Problemi aşağıdaki şekilde formüle edilebilir [47].

Amaç fonksiyonu;

$$\text{Min } \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} h_i * d_{ij} * y_{ij} \quad (2.4)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2.5)$$

$$y_{ij} \leq x_j, \quad \forall i \in I \text{ ve } \forall j \in J \quad (2.6)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (2.7)$$

$$x_j, y_{ij} \in \{0,1\} \quad (2.8)$$

Talep ağırlıklı toplam mesafenin en küçüklendiği Eş. 2.4 modelin amaç fonksiyonudur. Eş. 2.5 ile tüm talep noktalarının ataması yapılırken, Eş. 2.6 ile yalnızca açılan tesislere atama yapılması sağlanır. Eş. 2.7 ile P tane tesisin açılmasını ve yer seçimi yapılmasını sağlar.

P-Medyan probleminin her duruma uygun olmayabilen üç önemli varsayımı vardır. Bunların birincisi tüm tesislerin aynı sabit maliyete sahip olduğu, ikincisi açılacak tesisin

kapasite sınırının olmaması ve üçüncüsü ise açılacak tesis sayısının modelin girdileri arasında olmasıdır.

Kapasite kısıtsız sabit maliyetli yer seçimi problemi (uncapacitated fixed charge location problem)

Kapasite kısıtsız sabit maliyetli yer seçimi problemi, P-Medyan problem tipine çok benzerdir. Yalnızca açılacak tesis sayısı (p değeri) FCFL probleminde model parametreleri arasında değildir. f_j , j aday tesis noktasındaki sabit tesis maliyeti iken, P-Medyan probleminin Eşitlik 2.7 hariç tüm kısıtlarının kullanılarak Eş. 2.9'daki fonksiyonun en küçüklenmesini amaçlamaktadır. Burada c, her bir birim mesafe için birim taşıma maliyetidir. Ayrıca bu problem tipi de NP-zordur.

$$\text{Min } (\sum_{j \in J} f_j x_j + c * \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} h_i d_{ij} y_{ij}) \quad (2.9)$$

Kapasite kısıtlı sabit maliyetli yer seçimi problemi (capacitated fixed charge location problem)

Kapasite kısıtlı sabit maliyetli yer seçimi problemi, Balinski (1965) tarafından yukarıda bahsedilen üç varsayımın genişletilmesi temelinde kurulmuştur [54]. Bu modelin amacı, tesis yatırım ve taşıma maliyetleri toplamının en küçüklenmesidir. Bunu yaparken de açılacak tesislerin optimal sayısını ve yerini belirleyerek talep noktalarının açılacak tesislere atamasını da yapmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ise kapasite kısıtı nedeniyle talep noktaları kendilerine en yakın tesise atanmayabilmektedir.

Tüm taleplerin karşılanma zorunluluğu, tesis kapasitelerinin aşılmaması ve müşterilerin yalnızca açık fabrikalardan hizmet alması kısıtları altında tesis yatırım ve taşıma maliyetlerini minimize eden bir tesis yerleşimi problemidir.

Çalışmamızda kullandığımız sabit maliyetli yer seçimi probleminin matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

Amaç fonksiyonu;

$$\text{Min } \sum_{j \in J} f_j X_j + c * \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (2.10)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2.11)$$

$$Y_{ij} \leq X_j, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2.12)$$

$$\sum_{j \in J} h_i Y_{ij} - S_j X_j \leq 0, \quad \forall i \in I \quad (2.13)$$

$$X_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (2.14)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2.15)$$

Balinski'nin geliştirdiği bu modelde üstteki modelden farklı olarak Eş. 2.13 eklenmiştir. Burada S_j , j noktasında açılacak tesisin kapasite miktarıdır. Böylelikle modele arz noktalarının kapasite kısıtı getirilmiştir.

Maksimum kaplama probleminde açılacak P tane tesis ile en yüksek oranda talebin karşılanması amaçlandığından müşteri isteklerini karşılama hassasiyeti yüksektir. FCFL modeli, maliyetler üzerine yoğunlaşırken, maksimum kaplama modeli hizmet kalitesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Burada en az maliyetli çözümler, hizmet hassasiyetinde azalmaya yol açarken; hizmetin en fazla alanı kapsaması da yüksek maliyetlere yol açabilmektedir. Nozick, yer seçiminde hem maliyet hem servis kalitesini göz önüne almak amacıyla bu iki modeli birleştirmiştir. Nozick, bu çalışmasında kapsanmamasına izin verilen talep miktarını Kapasite kısıtlı sabit maliyetli yer seçimi modeline bir ilave kısıt olarak eklemiştir. Böylelikle öngörölen hizmet seviyesinin maliyet minimizasyonu ile birlikte elde edilmesi amaçlanmıştır [55].

Bu çalışmada, elektrik enerjisi üretiminde iletim kaybını en küçükleyen ko/trijenerasyon sistemlerden oluşan tesislerin ihtiyaç duyulan noktalara en yakın konumlandırılmasına yönelik bir problem ele alınmaktadır.

Maksimum kaplama probleminde kapsanması istenen talep miktarı iken, küme kaplama probleminde dikkate alınan tesis ile müşteri arasındaki uzaklıklardır. Yaptığımız çalışmada, lokal enerji üretim istasyonlarında üretilen enerjinin talep edilen noktanın dışında üretildiği ve şebeke veya boru hattı ile talep noktasına ulaştırıldığı varsayımı vardır.

Bu tez çalışmasında, Bölgesel Isıtma/Soğutma Ağlarının da dahil edildiği bölge ölçekli (district-scale) [40] lokal enerji üretim sistemlerinin tasarım ve planlaması ele alınmıştır. Bölgesel dağıtım ağı içeren DEK sistemlerinde tesis ile talep noktası arası mesafenin toplam sistem maliyeti üzerindeki etkisini göz önünde bulundurarak küme kaplama problemindeki azami kapsama mesafesini bir kısıt yardımıyla kapasiteli sabit maliyetli yer seçimi modeline ilave ettiğimiz bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak, tesisler ve müşteriler arası mesafenin modele önceden girilen kapsama mesafesi dâhilinde olması şartı getirilmiştir.

3. BÖLGE-ÖLÇEKLİ DAĞITIK ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇİN KAPSAMA MESAFESİ TEMELLİ AĞ TASARIMI

3.1. Geliştirilen Modelin Özellikleri, Varsayımları ve Katkısı

DEK sistemlerinden maksimum faydanın sağlanabilmesi için üretim birimlerinin optimal yerleşimi ve üretim teknolojilerinin optimal birleşimi çok önemlidir. Bu tez çalışmasında, birden fazla enerji türünün tekkaynaktan, bu enerjiyi tüketen binalar dışında üretilerek ve enerji dağıtım ağları aracılığıyla talep noktalarına ulaştırıldığı bölgesel ölçekli dağıtık enerji kaynaklarının ve dağıtım ağlarının optimal tasarımı için uzun vadeli (yıllık bazda) bir model geliştirilmiştir.

Modelde, talep noktası sayısı, bu talep noktalarının enerji taleplerini karşılayabilecek maksimum DEK sayısı ve bunların konumu modele girdi olarak verilmekte ve kurulan matematiksel modelde aday tesis noktalarının kapasiteleri ile müşterilerin talep miktarları her bir ürün için (elektrik enerjisi, termal enerji, soğutma enerjisi) ayrı ayrı ele alınmaktadır. Modelin amacı ise kurulacak tesisin boyut ve tipine (ikili/üçlü) göre ilk yatırım maliyetleri ile talep ağırlıklı müşteri-tesis uzaklığından doğan taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesidir.

Bu çalışmadaki DEKlerin enerjiyi tüketen binalar dışında konumlandırıldığı ve üretilen enerjinin enerji dağıtım ağları aracılığıyla talep noktalarına ulaştırıldığı varsayılmaktadır. Kısaca belirtmek gerekirse; Bölgesel Isıtma/Soğutma Ağlarının da dahil edildiği bölge ölçekli (district-scale) [40] lokal enerji üretim sistemlerinin tasarım ve planlaması ele alınmıştır. Son kullanıcıların enerji talepleri karşılanırken öncelikle, tesis ile kullanıcı arasındaki mesafe göz önünde bulundurulmuş ve model kapsama mesafesi temelinde kurulmuştur.

Burada özellikle altı çizilmesi gereken nokta, geliştirilen bu model ile aday enerji üretim tesisleri arasından seçilecek tesisin ilgili talep noktasına önceden belirlenen kapsama mesafesinden daha uzak bir noktadan seçilemeyeceğidir. Yani bir talep noktasının bir aday tesis noktasına atanabilmesi için aralarındaki mesafenin modele önceden girilen kapsama mesafesinden daha fazla olmaması gerekmektedir. Ne kadar az boru hattına ihtiyaç

duyulursa maliyetler ve kayıplar o kadar azalacağından geliştirilen bu modelde diğer çalışmalardan farklı olarak, tesisler ve müşteriler arası mesafenin modele önceden girilen kapsama mesafesi dâhilinde olması şartı getirilmiştir.

Bu amaçla, klasik kapasite kısıtlı sabit maliyetli tesis yer seçimi modeline [54] küme kaplama problemindeki [49] maksimum kapsama mesafesi eklenerek FCFL problemindeki uzaklıkların dikkate alınmaması zayıflığının giderilmesi amaçlanmıştır. Bu iki ayrı yöntemin birleştirilmesi ile *Maksimum Kapsama Mesafesi ilaveli Kapasite kısıtlı Sabit Maliyetli Tesis Yer Seçimi Modeli* önerilmiştir.

Geliştirilen modelde ayrıca termal ve elektrik iletim kayıpları da dikkate alınmıştır. Bu iletim kayıpları dikkate alınırken her i talep noktası ile j aday tesis noktası arasındaki d_{ij} uzaklığına bağlı olarak her kilometre için belirlenen yüzde oranında mevcut kapasiteden azalış olarak değil de ilgili enerji miktarının talebinde artış olarak modelin kapasite kısıdına eklenmiş ve ilgili atamalar bu şekilde yapılmıştır.

3.2. Matematiksel Model

Bu tez çalışmasında, mahallî enerji üretim istasyonlarında birden fazla enerjinin tek kaynaktan üretildiği ko/trijenerasyon sistemlerden oluşan bir enerji üretim ağı oluşturulması ve elektrik, ısı ve soğutma taleplerinin karşılanarak optimal atamaların yapılması problemi ele alınmıştır.

Bu amaçla maksimum kapsama mesafesinin de göz önünde bulundurulduğu *Azami Kapsama Mesafesi Eklemeli Kapasiteli Sabit Maliyetli Tesis Yer Seçimi Modeli* geliştirilmiş ayrıca modelde iletim kayıpları da dikkate alınmıştır. Geliştirilen modelin matematiksel formülasyonu aşağıdaki gibidir.

3.2.1. Notasyonlar

İndisler

i : talep noktası ($i \in I$)

j : aday tesis noktası ($j \in J$)

k: ürün (enerji) tipi (elektrik, termal, soğuk) ($k \in K$)

l: tesis boyutu (küçük, orta, büyük)

m: tesis tipi (kojenerasyon, trijenerasyon)

$N_i = \{ j \mid d_{ij} \leq DC \}$

$K_2 = \{2, 3\}$

Parametreler

f_{lm} : l boyutunda m tipi tesisin açma maliyeti (milyon Euro)

h_{ik} : i talep noktasının k ürünü talebi (GWh/yıl)

d_{ij} : i talep noktası ile j aday tesis noktası arası mesafe (hektametre)

DC: maksimum kapsama mesafesi (hektametre)

S_{lk} : l boyutunda tesisin k ürünü kapasitesi (GWh/yıl)

c_1 : hm başına elektriğin birim taşıma maliyeti (milyon Euro)

c_2 : termal ve soğuk enerji için hm başına ortalama birim taşıma maliyeti (milyon Euro)

Karar Değişkenleri

$$x_{jlm} = \begin{cases} 1, & j \text{ aday noktasında l boyutunda m tipi tesis açılacaksa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & i \text{ talep noktası k ürününü j tesisi den karşılıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Min}Z = \sum_j \sum_l \sum_m f_{lm} * x_{jlm} + c_1 * \sum_i \sum_j h_{il} * d_{ij} * y_{ijl} + c_2 * \sum \sum \sum_{k \in K_2} h_{ik} * d_{ij} * y_{ijk} \quad (3.1)$$

Eş 3.1 ile modelde açılacak tesisin boyut ve tipine göre tesis açma maliyeti ile talep ağırlıklı müşteri-tesis uzaklığı ile elektrik için ayrı, termal ve soğuk enerji için ise ayrı birim taşıma maliyetleri çarpılarak taşıma maliyetinin en küçüklemesini yapan bir amaç fonksiyonu kurulmuştur. ($K_2 = \{2, 3\}$)

Kısıtlar

$$\sum_l \sum_m x_{jlm} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (3.2)$$

Eş. 3.2 ile her j aday tesis noktasında farklı tip ve boyutta en çok 1 tesisin açılması sağlanmaktadır.

$$\sum_{j \in N_i} y_{ijk} \geq h_{ik} / M \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (3.3)$$

Eş. 3.3 ile her bir talep noktasının her ürün için yalnız bir üretim tesisine atanmasını sağlarken aynı zamanda azami kapsama mesafesi D_c nin dikkate alındığı N_i kümesi ($N_i = \{j \in J : d_{ij} \leq D_c\}$) ile de mevcut sabit maliyetli tesis yeri seçimi problemine küme kaplama problemi entegre edilerek iki model birleştirilmiştir.

Bu kısıtta talep M gibi büyük bir sayıya bölünerek; i talep noktasının k ürünü *talebi olmadığı* durumların göz ardı edilmemesi amaçlanmıştır (modelde $M=1000$ alınmıştır).

$$y_{ij3} \leq \sum_l x_{jl2} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (3.4)$$

$$y_{ijk} \leq \sum_l \sum_m x_{jlm} \quad \forall j \in J, \forall i \in I, k = 1, 2 \quad (3.5)$$

Eş. 3.4 ve Eş. 3.5 ile talep noktalarının yalnızca açılmış olan tesislere atanması amaçlanırken iki ayrı kısıt olarak yazılmasının nedeni ise açılacak tesislerin iki farklı tipte (kojen / trijen) olmasıdır. Eş. 3.4’de talep edilen enerji türünün soğuk enerji olması durumu göz önünde bulundurulmuş ve $k=3$ iken $m=2$ olması yani ilgili noktada açılacak tesisin trijenerasyon tesisi olması sağlanmıştır.

Eş.3.5’de ise yine k ürün çeşidi göz önünde bulundurulmuş böylece elektrik ve termal enerji için iki tesis tipinden (kojenerasyon veya trijenerasyon) herhangi birinin atanması

sağlanmıştır. Yine bu kısıtla Eş. 3.3’de sınırlandırılmayan y_{ijk} karar değişkeni de 0 veya 1 olmaya zorlanmaktadır.

$$\sum_i (1 + 0.005 * d_{ij}) * h_{ik} * y_{ijk} \leq \sum_l \sum_m S_{lk} * x_{jlm} \quad \forall j \in J, k=1 \quad (3.6)$$

$$\sum_i (1 + 0.03 * d_{ij}) * h_{ik} * y_{ijk} \leq \sum_l \sum_m S_{lk} * x_{jlm} \quad \forall j \in J, k=2,3 \quad (3.7)$$

Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 ise kapasite kısıtlarıdır. i noktasının k ürünü talebini, j tesisinin k ürünü kapasitesi ile kısıtlarken termal-soğuk ısı kayıpları ve elektrik iletim kayıpları da dikkate alındığı için iki ayrı kısıt olarak ele alınmıştır.

Bu iletim kayıpları km başına termal ve soğuk enerji için % 3; elektrik enerjisi için ise % 0.5 kabul edilmiş ve her i talep noktası ile j aday tesis noktası arasındaki d_{ij} uzaklığına bağlı olarak hesaplanacağından modelde kapasiteden azalma olarak değil de talepte aynı oranda artış olarak dikkate alınmıştır.

$$x, y \in \{0,1\} \quad (3.8)$$

Eş. 3.8 ile de x ve y karar değişkenleri 0-1 değişkenler olarak tanımlanmışlardır.

3.3. Örnek Problem

Örnek problemimizde AVM, otel, hastane, uydu kent, okul, iş merkezi gibi yerleşimsel ve ticari binalardan oluşan yaklaşık 150 hektarlık (1.500.000 m²) bir alanda 20 adet talep noktası ve bu noktaların enerji taleplerini karşılamak üzere 8 aday enerji üretim istasyonu ele alınmıştır.



Şekil 3.1. Bölgesel ölçekli dağıtık enerji üretim ağına temsilî gösterimi

3.3.1. Parametrelerin Tasarımı

Talep noktalarının enerji talepleri

Elektrik enerjisi talebi, yıllık olarak 5 ila 35 milyon kWh arasında rastsal olarak üretilmiştir. Termal ve soğuk enerji talepleri ise elektrik enerjisi talebine oranlanarak belirlenmiştir. Bu oranlar da termal enerji için 0.3 - 1.5 arasında; soğuk enerji için ise 0.05 - 0.3 arasında rastsal olarak belirlenmiştir. Örnek problemdeki 20 enerji talep noktasına ait yıllık talep değerleri (h_{ik}) GWh olarak Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Örnek problem için talep noktaları ve enerji türüne göre talep miktarları (GWh)

Talep Noktaları	Örnek yerleşkeler	Elektrik Enerjisi	Termal Enerji	Soğuk Enerji
1	Üniversite Kampusu 1	24,3	14,3	1,2
2	AVM 1	24,4	29,3	6,2
3	Uydu Kent (1000 konut)	14,5	14,8	1,8
4	Hastane 1	21,4	25,8	5,3
5	AVM 2	29,9	32,0	7,4
6	Okul 1	10,0	7,1	0,8
7	Uydu Kent (2000 konut)	20,4	17,5	3,2
8	Okul 2	13,2	5,5	2,1
9	Uydu Kent (1500 konut)	15,4	21,8	3,3
10	Camii	8,3	9,5	0,9
11	Kütüphane	13,7	6,8	1,1
12	Otel 1	19,8	16,5	1,6
13	Oto Sanayi Sitesi	33,7	39,3	8,7
14	Uydu Kent (1000 konut)	14,1	11,8	2,3
15	Okul 3	8,6	2,9	1,6
16	Kültür ve Sanat Merkezi	15,4	9,0	1,3
17	Otel 2	12,1	9,6	1,4
18	İş Merkezleri	24,4	25,0	2,7
19	Hastane 2	19,2	26,6	3,9
20	Üniversite Kampusu 2	20,1	22,4	2,2

Talep noktaları ile aday tesis noktaları arası uzaklıklar

Aday tesis noktaları ile talep noktaları arası uzaklık (d_{ij}) talep noktaları için 1-15 arası, aday tesis noktaları için ise 2-13 arasında rastsal x ve y koordinatları oluşturulup, modelin GAMS ile kodlanması esnasında bu koordinatlardan Öklid uzaklıkları hesaplanarak Çizelge 3.2.'deki gibi bulunmuştur.

Aday tesislerin enerji üretim kapasiteleri ve yıllık üretim miktarları

Açılacak aday tesis noktaları üretim kapasitelerine göre küçük-orta-büyük olarak sınıflandırılmıştır. Literatürden yararlanılarak elektrik enerjisi üretim gücü 1-5 MW arasında olan tesisler küçük; 5-10 MW arasında olanlar orta; 10-20 MW arasında olanlar ise büyük boyutlu tesisler olarak ele alınmıştır.

Çizelge 3.2. Müşteriler ile tesisler arası uzaklıklar ($d_{ij} - h_m$)

Öklid Uzaklığı		Aday Tesis Noktaları							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Talep Noktaları	1	4,12	4,47	4,00	1,41	5,38	6,40	4,12	5,09
	2	4,47	4,12	7,28	5,00	8,94	8,25	7,07	8,06
	3	2,24	7,62	7,07	6,33	9,22	6,08	6,40	7,21
	4	3,16	5,39	6,71	5,00	8,60	7,07	6,33	7,28
	5	5,83	13,45	7,28	9,43	9,05	3,16	6,33	6,08
	6	5,39	4,00	8,25	5,83	9,85	9,22	8,06	9,05
	7	6,00	12,53	5,00	7,81	6,33	2,00	4,24	3,61
	8	8,94	2,24	8,06	5,00	8,25	11,31	8,60	9,43
	9	5,83	13,45	7,28	9,43	9,06	3,16	6,33	6,08
	10	11,31	3,61	11,71	8,54	12,17	14,42	12,08	13,00
	11	6,71	9,06	11,40	10,00	13,45	10,44	10,82	11,66
	12	2,24	8,60	3,16	4,47	5,39	2,24	2,24	2,83
	13	2,83	10,63	6,08	7,28	8,25	2,83	5,10	5,39
	14	6,33	11,71	3,61	6,71	4,47	2,83	3,16	2,24
	15	3,61	11,40	7,07	8,25	9,22	3,61	6,08	6,33
	16	7,07	1,00	8,06	5,00	9,06	10,30	8,25	9,22
	17	6,40	10,20	2,00	5,10	2,24	4,12	2,24	1,41
	18	7,21	1,00	7,28	4,12	8,00	10,00	7,62	8,54
	19	5,39	12,81	6,33	8,60	8,06	2,24	5,39	5,10
	20	10,30	3,00	9,43	6,40	9,49	12,73	10,00	10,82

Elektrik enerjisi üretim kapasiteleri her boyut için ayrı ayrı belirtilen değerler arasında rastsal üretilmiştir. Termal ve soğuk enerji üretim kapasiteleri de başlangıçta belirlenen elektrik enerjisi üretim kapasitelerinin belirli oranları alınarak tespit edilmiştir. Örneğin elektrik enerjisi üretim kapasitesi 9470 kW olarak alınan orta boyutlu bir tesisin termal enerji üretme kapasitesi, elektrik üretiminin %75'i alınarak 7102 kW, soğuk enerji üretme kapasitesi de yine elektrik üretim kapasitesinin %40'ı alınarak 3788 kW olarak bulunmuştur.

Üretim kapasiteleri, tesislerin günde 18 saat, yılda 365 gün çalıştığı varsayılarak yıllık üretim miktarlarına dönüştürülmüştür. Örneğin 10700 kW kapasiteli büyük boyutlu bir tesisin yıllık elektrik enerjisi üretim miktarı $10700 \times 18 \times 365$ 'den 70.300.000 kWh yani 70,3 GWh olarak bulunur.

Örnek problem için tesis kapasiteleri (S_{ik}) de tesis boyutu ve ürün çeşidine göre Çizelge 3.3.'teki gibi verilmiştir.

Çizelge 3.3. Boyutlarına göre tesislerin kapasiteleri (GWh)

	Tesis Enerji Üretim Kapasitesi		
Tesis Boyutu	Elektrik	Termal	Soğuk
Küçük	25,8	22	12,9
Orta	44,8	33,6	17,9
Büyük	88,2	70,5	22

Tesislerin ilk yatırım maliyetleri

Açılacak tesislerin ilk yatırım maliyetleri (f_{lm}), belirlenirken tesisin elektrik üretim kapasitesi dikkate alınmıştır. Yapılan enerji piyasası araştırması neticesinde her 1 kW lık güç için ilk yatırım maliyeti 500 € olarak kabul edilmiştir. Böylece kojenerasyon tesisleri için elektrik üretim kapasiteleri 500 ile çarpılarak ilk yatırım maliyetleri milyon € (Euro) cinsinden örnek problemde kullanılmıştır.

Trijenerasyon tesislerinin ilk yatırım maliyetleri hesaplanırken ise sisteme dâhil edilecek soğutucuların soğuk enerji üretim kapasiteleri ve açılacak tesisin boyutu dikkate alınarak 16.000 ila 450.000 € arasında ilave maliyetler eklenmiştir. Örnek problem için tesis boyutlarına göre ilk yatırım maliyetleri, Çizelge 3.4.’deki gibidir.

Çizelge 3.4. Tesislerin ilk yatırım maliyetleri (milyon €)

	Kojen	Trijen
Küçük	2	2
Orta	3,4	3,6
Büyük	6,7	6,7

Dc (coverage distance) - Azami kapsama mesafesi

Modele entegre edilen küme kaplama modelinin bir parçası olarak, aday tesis noktaları ile talep noktaları arasında dikkate alınacak en uzak mesafe diye nitelendirilen maksimum kapsama mesafesi tüm örnek problemler için 2 - 12 hm arasında rastsal seçilerek atanırken örnek problemimizde Dc; 2, 3, 6, 7, 8, 10 ve 12 hm için ayrı ayrı ele alınıp sonuçları karşılaştırılmış ve kapsama mesafesinin sonuç üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Birim taşıma maliyetleri

Problemde birim taşıma maliyetleri ise termal ve soğuk enerjinin dağıtımı için oluşturulacak (DHCN -District Heating Cooling Network) Bölgesel Isıtma-Soğutma Şebekesinin döşeneceği varsayılan izolasyonlu boru hattı göz önünde bulundurularak hı başına birim taşıma maliyeti (C_2),elektrik enerjisinin birim taşıma maliyeti (C_1)’den farklı ele alınmıştır. Oluşturulan test problemlerinin genelinde c_1 değeri 0.000001 – 0.000005 milyon € arasında rastsal seçilirken, c_2 değeri ise 0.0002 – 0.0006 milyon € arasında rastsal bir değer olarak alınmıştır. Ele aldığımız örnek problemde ise $c_1 = 0.000001$ milyon €, $c_2 = 0.0006$ milyon € olarak alınmıştır.

Termal ve Elektriksel Kayıplar

Problemde dağıtım şebekesinde oluşacak termal ve elektriksel kayıplar da literatürden [17,42] yola çıkılarak göz önünde bulundurulmuştur. Yukarıda ayrıntılarıyla ele alınan modelde kapasite kısıtları Eş. (3.6) ve (3.7)’de ilgili kayıplar termal ve soğuk enerji için % 3; elektrik enerjisi için ise % 0.5 kabul edilmiş ve her i talep noktası ile j aday tesis noktası arasındaki d_{ij} uzaklığına bağlı olarak model tarafından dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.7. $D_c = 3$ hm (300 m) için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları

• Amaç fonksiyonu değeri: $Z = 32,1046$								
$D_c = 3$ hm	Aday Tesis Noktaları							
Talep Noktaları	1	2	3	4	5	6	7	8
1				elk, trm, sgk				
2	Atama yok							
3	trm		elk				sgk	
4			elk, trm				sgk	
5	Atama yok							
6							elk, trm, sgk	
7						elk, trm, sgk		
8		elk, trm, sgk						
9	Atama yok							
10	Atama yok							
11							elk, trm, sgk	
12						elk, sgk		trm
13	trm, elk					sgk		
14						elk, trm, sgk		
15	Atama yok							
16		elk, trm, sgk						
17								elk, trm, sgk
18		elk, trm, sgk						
19						elk, trm, sgk		
20		elk, trm, sgk						

Çizelge 3.8. $D_c = 6$ hm için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atama sonuçları

• Amaç fonksiyonu değeri: $Z = 38,8437$								
$D_c = 6$ hm	Aday Tesis Noktaları							
Talep noktası	1	2	3	4	5	6	7	8
1					elk, trm, sgk			
2			sgk				elk, trm	
3			elk, trm, sgk					
4	sgk						elk, trm	
5						elk, trm, sgk		
6	trm		sgk				elk	
7						elk, sgk		trm
8		elk			trm, sgk			
9	sgk					elk, trm		
10		elk, trm			sgk			
11			sgk			elk, trm		
12	trm					sgk		elk
13	elk, trm, sgk							
14						sgk		elk, trm
15	elk, sgk		trm					
16		elk, trm			sgk			
17						trm, sgk		elk
18		elk, trm,			sgk			
19						elk, sgk		trm
20		elk, trm			sgk			

Çizelge 3.9. $D_c = 8$ hm için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları

- Amaç fonksiyonu değeri: $Z = 38,8268$ - Muhtemel en iyi çözüm = 38,3907 - Mutlak Fark = 0,4360 - Nispi Fark = 0,0112 - Yüzde sapma: % 1,14								
$D_c = 8$ hm	Aday Tesis Noktaları							
Talep Noktaları	1	2	3	4	5	6	7	8
1					elk, trm, sgk			
2	sgk						elk, trm	
3			elk, trm, sgk					
4			sgk				elk, trm	
5						elk, trm, sgk		
6					sgk		elk, trm	
7						elk, sgk		trm
8		elk			trm, sgk			
9						elk, sgk		trm
10		elk, trm,			sgk			
11	trm		sgk				elk	
12	elk, trm, sgk					trm	elk	
13	elk, trm, sgk						trm	
14						sgk		elk, trm
15	elk, sgk					trm		
16		elk, trm			sgk			
17	sgk							elk, trm
18		elk, trm			sgk			
19			sgk			elk, trm, sgk		
20		elk, trm			sgk			

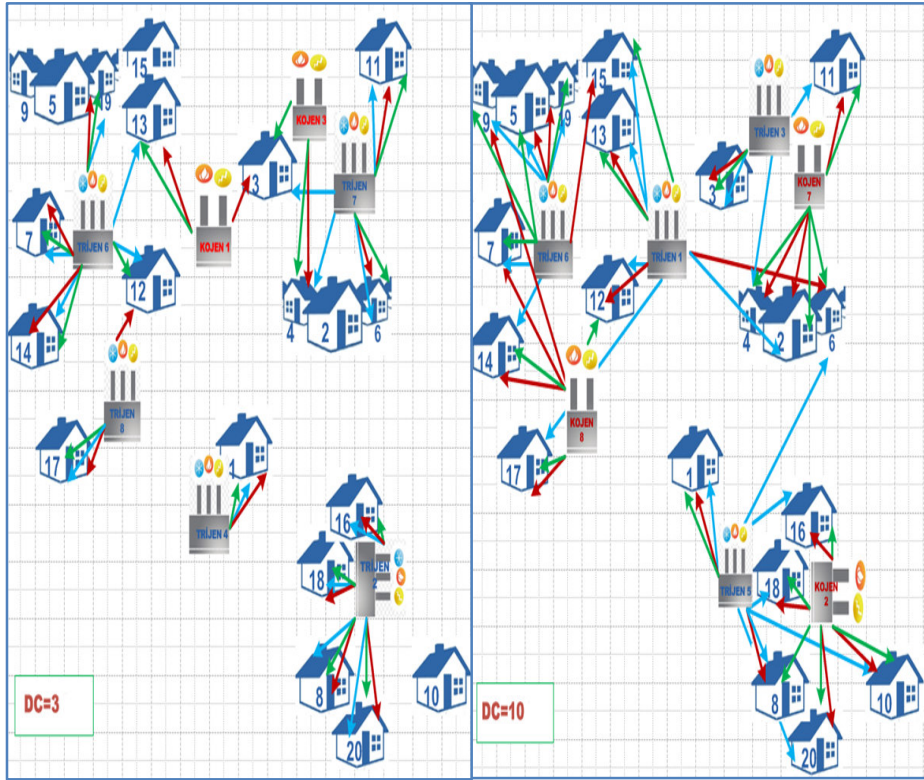
Çizelge 3.10. Dc = 10 hm için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları

- Amaç fonksiyonu değeri: Z= 38,8187 - Muhtemel en iyi çözüm = 37,9830 - Mutlak Fark = 0,8357 - Nispi Fark = 0,0215 - Yüzde sapma: % 2,2								
Dc = 10 hm	Aday Tesis Noktaları							
Talep Noktaları	1	2	3	4	5	6	7	8
1					elk, trm, sgk			
2	sgk						elk, trm	
3			elk, trm, sgk					
4			sgk				elk, trm	
5						elk, trm, sgk		
6	trm				sgk		elk	
7						elk, sgk		trm
8		elk			trm, sgk			
9						elk, sgk		trm
10		elk, trm			sgk			
11			sgk				elk, trm	
12	trm, sgk							elk
13	elk, trm, sgk							
14						sgk		elk, trm
15	elk, sgk					trm		
16		elk, trm			sgk			
17	sgk							elk, trm
18		elk, trm			sgk			
19						elk, trm, sgk		
20		elk, trm			sgk			

Çizelge 3.11. Dc = 12 hm için i talep noktalarının talep ettikleri enerji türlerine göre enerji üretim tesislerine atanma sonuçları

- Amaç fonksiyonu değeri: Z= 38,8305 - Muhtemel en iyi çözüm=37,8577 - Mutlak Fark = 0,9728 - Nispi Fark = 0,0251 - Yüzde sapma: % 2,6								
Dc = 12 hm	Aday Tesis Noktaları							
Talep Noktaları	1	2	3	4	5	6	7	8
1				elk, trm, sgk				
2			sgk				elk, trm	
3			elk, trm, sgk					
4	sgk						elk, trm	
5						elk, sgk, trm		
6	trm		sgk				elk	
7						elk, sgk		trm
8		elk		trm, sgk				
9						elk, sgk		trm
10		elk, trm		sgk				
11			sgk				elk, trm	
12	elk, trm, sgk					trm	elk, sgk	
13	elk, trm, sgk							
14						sgk		elk, trm
15	elk, sgk					trm		
16	sgk	elk, trm						
17				sgk				elk, trm
18		elk, trm		sgk				
19						elk, trm, sgk		
20		elk, trm		sgk				

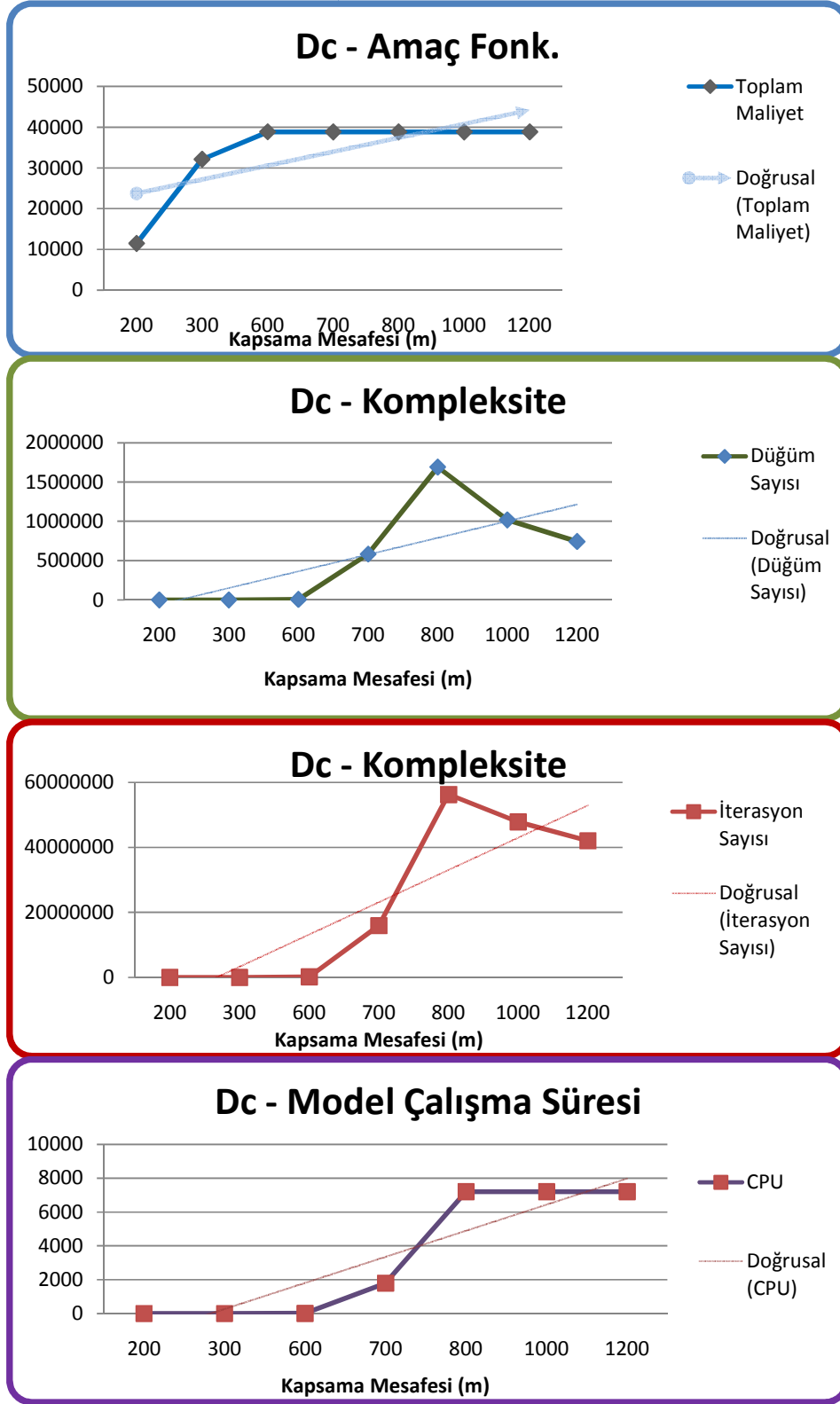
3.3.3. Farklı kapsama mesafeleriyle elde edilen çözümlerin değerlendirilmesi



Şekil 3.2. Örnek problemde kapsama mesafesi 300 ve 1000 metre için atama sonuçlarının şematik gösterimi

Çizelge 3.5'ten 3.11'e kadar sonuçlar, Şekil 3.2'deki atamalar ve Şekil 3.3'deki grafikler incelendiğinde kapsama mesafesi az iken kapsanmayan talep noktalarının çokluğu ($D_c=200$ m için 15 adet, $D_c=300$ m için 5 adet) dikkati çekmektedir. Bu durumda toplam sistem maliyeti düşük çıkmış olsa da karşılanamayan taleplerin olması arzu edilen bir durum değildir. Tüm talep noktaları kapsandıktan sonra kapsama mesafesi ile toplam maliyet arasındaki ilişki yalnızca taşıma maliyetleri kaynaklı görülmektedir.

Modelin çözüm algoritmasında karmaşıklık göstergelerinden olan iterasyon sayısı ve düğüm sayısı değerleri de kapsama mesafesinin artışında belli bir noktaya kadar etkilenebilmektedir. $D_c=800$ metrede bu değerler tavan yapmış ve çözüm süresi önceden belirlenen sınıra (7200 saniye) ulaşmıştır. Model bu noktada muhtemel en iyi çözümden (üst sınırdan) %1.14 lük bir sapma ile tüm talepleri karşılamıştır. Yine kapsama mesafesinin artmasının model çalışma süresini doğrudan etkilediği ve arttırdığı görülmektedir.



Şekil 3.3. Kapsama mesafesinin model çıktıları üzerindeki etkisi

3.4. Modelin Test Edilmesi

Çalışmanın bu aşamasında ise oluşturulan matematiksel modelin sınırlarının belirlenmesi amacıyla farklı parametre aralıkları için 100 adet test problemi oluşturulmuştur. GAMS ara yüzünde kodlanan bu test problemleri, CPLEX 8.1 çözücü yardımıyla çözülmüştür. 10 farklı boyutta geliştirilen her bir problem büyüklüğü için 10'ar adet aynı boyutta farklı parametrik yapıda örnek problem çözülerek, toplamda 100 adet sonuç elde edilmiştir. Parametreler aşağıda belirtildiği aralıklarda rastsal olarak üretilmiştir.

- *Kapsama mesafesi:* Maksimum kapsama mesafesi, 2 ila 12 km arasında alınmıştır.
- *Koordinatlar:* Talep noktaları ve aday tesis noktalarının koordinatları, 1-15 aralığında rastsal üretilmiş ve daha sonra aralarındaki mesafe, Öklid uzaklığıyla hesaplanmıştır.
- *Km başına birim taşıma maliyetleri:* Elektrik, termal ve soğuk enerji için tek bir ortalama c değeri yerine elektriğin birim taşıma maliyeti her yüz metre için (hektometre başına) c_1 : 0,000001 – 0,000005 milyon € ya da 2,8 – 14 Türk lirası arasında alınırken;
- Termal ve soğuk enerji için ise Bölgesel Isıtma-Soğutma Ağı oluşturulması gerekliliği ve yalıtımlı boru hattı döşeme durumu göz önünde bulundurularak hektometre başına c_2 : 0,00002 – 0,0006 milyon € ya da 500 ila 1500 Türk Lirası arasında alınmıştır.
- *Termal ve Elektriksel Kayıplar:* dağıtım şebekesinde oluşması muhtemel termal ve elektriksel kayıplar literatür [17,34,42] dikkate alınarak ortalama bir değer olarak ele alınmıştır.

Bu kayıp oranı; kapasite kısıdına yansıtılmak suretiyle müşteri ile tesis arasındaki d_{ij} uzaklığı dikkate alınarak termal ve soğuk enerji için her yüz metrede % 3; elektrik enerjisi için ise yine her yüz metrede % 0.5'lik bir iletim-dağıtım kaybı göz önünde bulundurulmuştur.

Ancak bu kayıp, modeldeki indis kullanımından dolayı direk tesis kapasitesinde azalış olarak değil de tesis ile müşteri arasındaki uzaklığa bağlı ilgili ürün talebinde belirlenen

kayıp yüzdesi kadar artış olarak ele alınmıştır. Problem setleri, modelde ele alınacak talep noktası ve aday tesis noktası sayıları dikkate alınarak oluşturulmuştur.

3.4.1. Test sonuçları

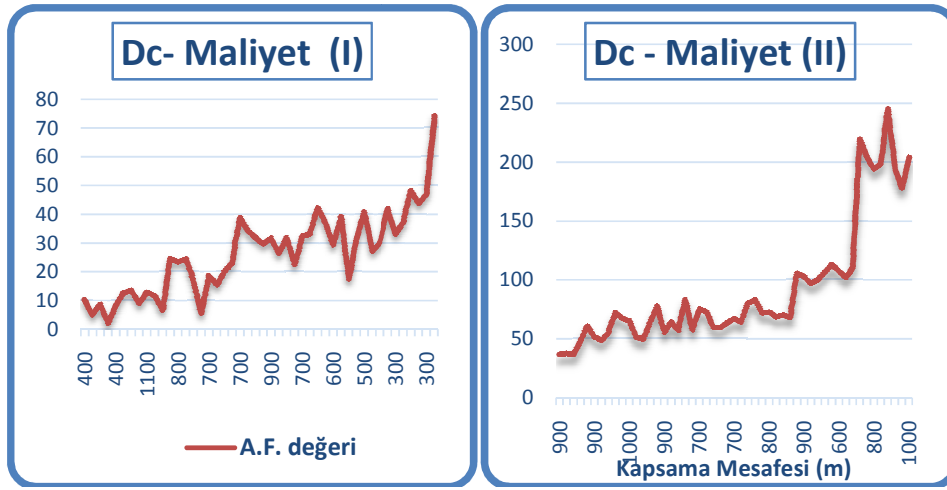
Çizelge 3.12. Problem setleri için matematiksel model ile elde edilen ortalama çözüm sonuçları

Prob. Seti	Talep Noktası Sayısı	Aday Tesis Sayısı	Ort. Çözüm Süresi (sn)	Alt Sınır Ort. Değeri	Üst sınır Ort. Değeri	Yüzde Sapma	Ort. İter. Sayısı	Ort. Düşüm Sayısı	Ort. Dc	Opt. Ulaşılan prob. sayısı
1	5	2	0.03	9.15	9.15	0	28	4	7	10
2	10	4	1.10	17.69	17.69	0	27474	1530	6	10
3	15	6	447.11	31.05	31.05	0	5367735	201070	9	10
4	20	8	2853.8	34.62	34.3	0.92	20612336	562825	7	7
5	25	10	3911.5	43.02	42.17	1.66	18302425	281668	7	5
6	30	12	5773.5	59.1	57.14	3.27	28259836	511072	8	3
7	35	14	6647.2	63.68	61.01	4.16	27895929	440645	7	1
8	40	16	5760	68.23	65.27	4.39	24321810	325675	5	2
9	50	20	7200	105.22	97.48	7.99	25325270	472977	8	0
10	100	40	7200	203.79	181.94	12.01	11287922	188854	7	0

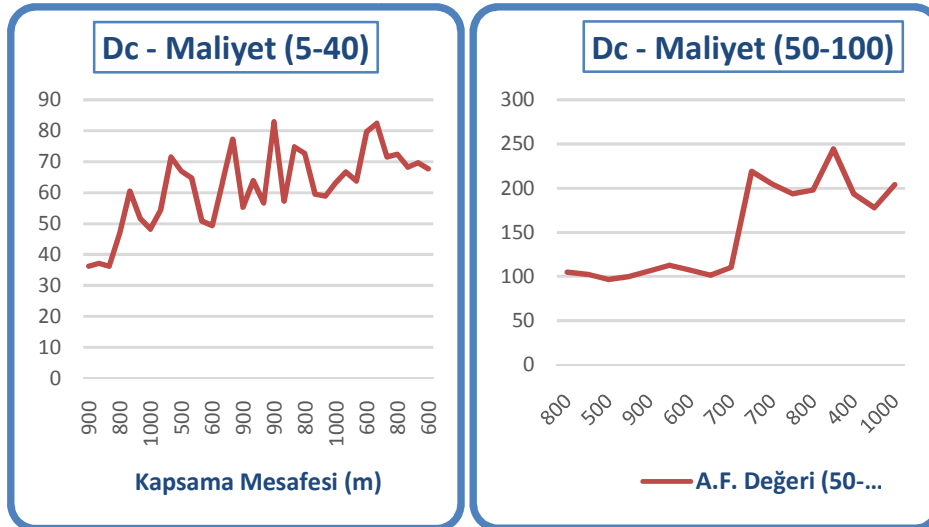
Her bir boyut için üretilen 10'ar adet probleme ait ayrıntılı çözüm sonuçları EK-1'de verilmiştir. Bütün koşullar 2 saat ($2 \times 60 \times 60 = 7200$ saniye) ile sınırlandırılmıştır. Alt sınır ile çözücünün elde ettiği amaç fonksiyonu değeri kastedilirken; modelin 7200 saniye çalışması sonucu elde edilen çözümün dışında çözücü tarafından muhtemel en iyi sonuç olarak (best integer possible) verilen değer de üst sınır değeri olarak kabul edilmiştir. Mutlak fark, nispi fark ve yüzde sapma değerleri bahsedilen değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

Sonuç tablosundan da anlaşıldığı üzere problem boyutu arttıkça ortalama çözüm süresi artmakta, en iyi çözüme ulaşılan yani alt sınır ile üst sınır değerlerinin aynı olduğu problem sayısı azalmaktadır. Çözüm süresini etkileyen bir diğer parametre de modele eklenen maksimum kapsama mesafesinin büyüklüğüdür. Bu değer 2-12 arasında rastsal seçilmiştir. Dc değeri küçüldükçe talebi karşılanan müşteri sayısı azaldığından çözüm süresi de azalmaktadır. Alt ve üst sınır değerleri arasındaki fark ve modelin başarı oranını ifade eden yüzde sapma değeri de model boyutuyla birlikte artış göstermektedir.

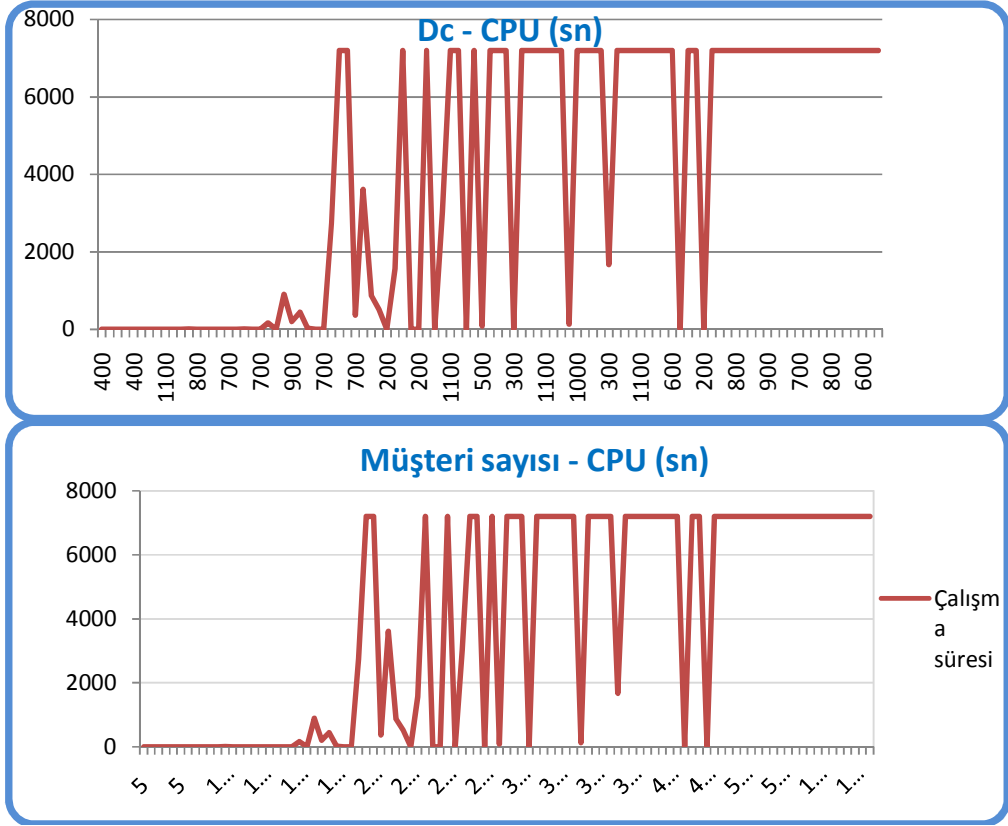
3.4.2. Test sonuçlarının değerlendirilmesi



Şekil 3.4. Optimalite bulan (I) ve optimalite bulamayan (II) test problemleri için kapsama mesafesi ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişki



Şekil 3.5. Optimalite bulamayan 5 ila 40 müşterili ve 50 ila 100 müşterili test problemleri için kapsama mesafesi ile amaç fonksiyonu arasındaki ilişki



Şekil 3.6. Modelin çalışma süresi ile kapsama mesafesi ve müşteri sayısı arasındaki ilişki

Bu testin sonucunda problem boyutu arttıkça ortalama çözüm süresinin arttığı, en iyi çözüme ulaşılan yani alt sınır ile üst sınır değerlerinin aynı olduğu problem sayısı azaldığı görülmüştür.

Test problemlerinin çözüm sonuçları değerlendirilirken yalnızca artan problem boyutunun (5-100 arası) değil, belirli bir noktaya kadar modele girilen kapsama mesafesinin de hem maliyetler hem de çözüm süresi üzerinde etkili olduğu görülmektedir (Şekil 3.4 - 3.6).

4. GELİŞTİRİLEN SEZGİSEL ÇÖZÜM YÖNTEMİ

4.1. Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar; doğal seleksiyon (seçim) prensibinden yola çıkılarak geliştirilmiş arama algoritmalarıdır. Algoritma, belirli bir uzunluğa sahip dizilerden oluşmuş bir veri yığınının sahiptir. Yığın içindeki her bir dizi, çözüm uzayında bir noktayı temsil eder. Bu diziler aynı zamanda üreme yolu ile varlığını sürdürmeye aday olan birer bireydir. Algoritmanın temel işleyişi, çözüme uygun olmayan bireyleri elemek, çözüme daha uygun bireyleri seçmek ve seçilen bireylerden yeni bireyler üretmek doğrultusundadır. Algoritmanın işleyişi aşamalı olarak düşünüldüğünde temel prensibinin eleme olduğu anlaşılmaktadır. İkinci prensip ise, elemeyi aşan bireylerden yararlanılarak olası yeni çözümler elde etmektir. Bu da bireyler arasındaki bilgi alışverişi ile sağlanır. Bireyler arası rastsal bilgi alışverişi, arama işleminin, çözüm uzayının daha uygun noktalarında devam etmesini sağlar.

Genetik algoritma, stokastik bir arama yöntemidir. Darwin' in öne sürdüğü evrim teorisinin, "en uygun olan yaşar" ilkesine dayanmaktadır. Biyolojik sistemlerin gelişim sürecini modelleyen GA, ilk olarak Holland (1975) tarafından önerilmiştir[56]. Sezgisel bir yöntem olan GA, problem için en optimum sonucu bulamayabilir, ancak bilinen metotlarla çözülemeyen veya çözüm zamanı çok büyük olan problemlerde optimuma çok yakın çözümler vermektedir.

4.2. Çözüm Yönteminin İşleyişi

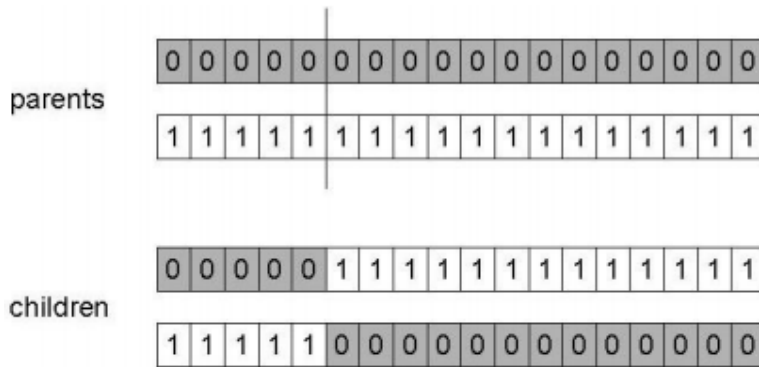
Öncelikle popülasyon büyüklüğüne karar verilir. Daha sonra diğer başlangıç parametreleri (en yüksek iterasyon sayısı, başlangıç ve bitiş sıcaklıkları, soğutma oranı ve kontrollü birey yüzdesi) belirlenir. Başlangıç ataması için aşağıdaki adımlar takip edilir.

Müşterilerin aday tesis noktalarına uzaklıkları dikkate alınarak, her bir müşteri için maksimum kapsama mesafesi dâhilinde olan tesislerin tutulduğu “yakınlık” dizileri oluşturulur. Bu dizilerde en az sayıda tesise yakın olandan başlayarak kapasite kontrollü başlangıç atamaları yapılır. Yapılan atamaya göre açılacak tesisin boyut ve türüne de karar verilip, bu bilgiler ayrı bir dizide tutulur.

Ancak bu aşamada başlangıç atamasının tümünün feasible yani uygun bireylerden oluşması, çözüm alanını daraltıp çaprazlama esnasında kötü (infeasible) çözümlerden gelecek çeşitliliği engellemiş olacaktır. Bu durumun önüne geçmek amacıyla başlangıç aşamasında yapılacak kapasite kontrollü atamanın belirli bir oranda kalması ve böylelikle kapasiteyi aşan kötü çözümlere de başlangıç atamasında yer verilmesi daha uygun görülmüştür. Kontrollü birey yüzdesi, diğer başlangıç parametreleri ile birlikte algoritmaya dâhil edilmektedir.

Uygunluk değeri amaç fonksiyonu olarak belirlenmiş ve toplam maliyetin en küçüklenmesi şeklinde ele alınmıştır. Başlangıç ataması yapıldıktan sonra her bir kromozomun amaç fonksiyonu değeri, uygunluk değeri olarak hesaplanır. Elde edilen en iyi çözüm “En iyi” olarak elde tutulur, her bir kromozomun (çözümün) uygunluk değeri hesaplanır, hesaplanan uygunluk değeri o zamana kadar elde edilen “En iyi” çözümün uygunluk değerinden daha iyiye “En iyi” güncellenir. Tüm kromozomlar için bu işlem yapılır.

Popülasyon içerisinde çaprazlanacak bireylerin seçilmesi aşamasında, seçim mekanizması olarak *Rulet Çemberi* kullanılmıştır. Öncelikle tüm bireylere ait amaç fonksiyon değerleri toplanır. Problem tipimiz minimizasyon olduğu için bu toplam her bir kromozom için kendi amaç fonksiyon değerine bölünüp elde edilen sonuçlar ($a_1, a_2, \dots, a_n$) tekrar toplanır ve bu değerler ($a_1, a_2, \dots, a_n$), ikinci toplama bölünerek 0-1 arası bir olasılık değeri elde edilir. Bu arada atanan rastsal bir P değeri, olasılıkların kümülatif toplamında hangi aralığa denk gelirse; o aralıktaki ebeveyn seçilir.



Şekil 4.1. Uniform çaprazlama örneği

Uniform çaprazlama ile ebeveynler çaprazlanır. Çaprazlama noktası sayısı, 2 ile (talep noktası sayısı – 1) aralığında düzgün dağılımla belirlenir. Elde edilen çocukların uygunluk değerleri hesaplanır, çocuklardan birinin uygunluk değeri, “En iyi”den iyi ise “En iyi” güncellenir. Yalnız burada Genetik Algoritma’daki yaygın kullanımın dışına çıkılarak, kötü bireyin popülasyondan çıkarılması yerine; belirli bir “kabul olasılığı” ile popülasyonun en altına eklenmesi yoluna gidilmiştir.

Yukarıda da belirtildiği gibi geliştirdiğimiz bu çözüm yönteminde popülasyon genişliği sabit değildir, başlangıç parametresi olarak girilen değerin % 20’si kadar genişleyebilmektedir. Bu oranı aştığında ise en kötü çözüm popülasyondan çıkarılır.

Kabul olasılığının hesaplanması

C_1 , Çocuk 1 ve A_1 Aile (ebeveyn) 1, Z de ilgili uygunluk fonksiyonu değerleri iken;

$\Delta = \frac{Z(C_1) - Z(A_1)}{T_i}$ ve kabul olasılığı $e^{-\left(\frac{\Delta}{T_i}\right)}$, dir.

Çözüm uzayında daha çok alanı taramak ve çaprazlama ile kötü çözümlerden de faydalanarak çeşitliliği arttırmak için Tavlama Benzetimindeki “kabul olasılığı” özelliği çözüm yöntemine ilave edilmiştir. Burada, popülasyondan çıkarılmayan kötü çözümler, yalnızca çeşitliliğe katkı sağlarlar, uygunlukları hesaplanırken ceza maliyeti aldıklarından “en iyi” olarak tutulamazlar.

Maksimum iterasyon sayısı kadar çaprazlamaya devam edilir.

ρ : soğutma oranı iken

$$T_{i+1} = (1 - \rho) * T_i \quad (4.1)$$

Soğutma oranı, Eş. 4.1’deki gibi hesaplanarak mevcut sıcaklık düşürülür. Son sıcaklığa gelince algoritma sonlandırılır. Bu aşamada elde edilen çözüm, aynı zamanda problemin de çözümünü vermektedir.

Kromozom yapıları oluşturulurken permütasyon kodlama kullanılmıştır. Kromozomun uzunluğu, talep noktası sayısı kadardır. m adet talep noktası uzunluğunda kromozoma n adet aday tesis varken, $(n-1)$ 'e kadar sayı ataması yapılır. Genlerin kromozomdaki pozisyonu (lokus) ağdaki düğümleri ifade ederken genlerin değerleri ise 0 ile $(n-1)$ aralığında rastsal olarak belirlenmiştir.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
6	4	1	6	5	2	5	1	5	0	4	0	7	6	6	1	1	5	8	4	4	6	2	5	9	<i>Elektrik</i>
7	4	1	6	5	2	0	4	7	0	4	0	7	7	6	1	5	5	8	4	2	3	2	7	9	<i>Termal</i>
6	4	1	6	5	2	5	1	5	0	4	0	7	6	6	1	9	5	8	4	4	1	2	5	9	<i>Soğuk</i>

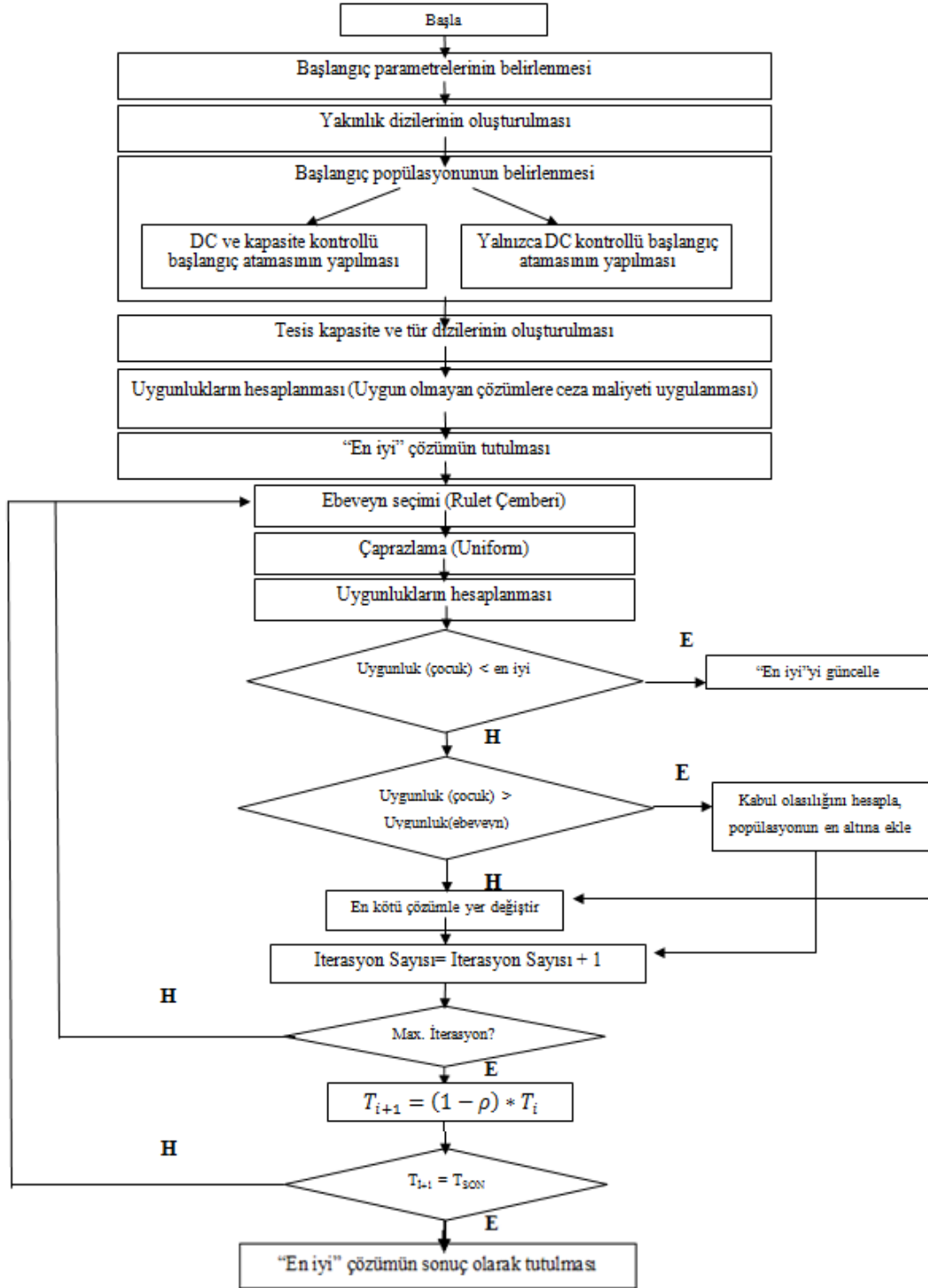
Şekil 4.2. Kromozom yapısı

Kromozom oluşturulurken üç ayrı enerji türü dikkate alındığından her bir enerji türü için farklı satırlar kullanılmıştır. Tesis kapasitesinin belirlenmesinde termal kapasite baskınken, tesis tipinin belirlenmesinde ise soğuk enerji atamaları belirleyicidir. Çaprazlama operatörü ise elektrik ve termal satırlarına uygulanmaktadır. Soğuk ataması ise elektrikle birlikte yapılır.

Açılacak tesislerin tipleri ve kapasiteleri algoritma boyunca her aşamada güncellenen ayrı dizilerde tutulmaktadır.

Başlangıç popülasyonunun tamamı maksimum kapsama mesafesi kontrollü; belirli bir kısmı ise kapasite kontrollü olarak oluşturulmuştur. Algoritmanın başında belirlenen oran kadar başlangıç ataması, kapasite ve DC kontrollü yapılırken; bu oranın dışında kalan kısımda yalnızca DC kuralı dikkate alınır. Böylelikle, uygun olmayan çözümlerden gelecek çeşitlilikten çaprazlama ile faydalanmak mümkün olmaktadır. Çözüm uzayında daha fazla alan taranabilmektedir. Çaprazlama ile oluşan bireylerden, yine uygun olmayanlara “ceza maliyeti” uygulandığından, “En iyi” olarak tutulamazlar.

Uygulanan çözüm yönteminin akış şeması Şekil 4.3.’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Sezgisel çözüm yönteminin akış şeması

4.3. Elde Edilen Sonuçlar

Kapsamlı olarak yapılan denemeler sonucunda başlangıç parametreleri aşağıdaki tabloda görüldüğü değerlerde en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Genetik Algoritma ile kullanılan başlangıç parametreleri

	Parametre 6	Parametre 16	Parametre 19	Parametre 22
Popülasyon genişliği	300	600	1000	1200
Maks. İterasyon sayısı	200	125	200	300
Başlangıç sıcaklığı	7500	3000	5000	3000
Son sıcaklık	1	1	1	1
Soğutma oranı	0,01	0,01	0,02	0,05
Kontrollü birey yüzdesi	0,2	0,3	0,2	0,3

Bu parametreler kullanılarak uygulanan çözüm yöntemi ile elde edilen sonuçların, GAMS ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması Çizelge 4.2'deki gibidir (Bkz. Ek-2 ve 3). Bu karşılaştırma, başlangıç parametreleri açısından değerlendirildiğinde, çözüm sonuçları üzerinde en etkin parametrenin popülasyon genişliği olduğu görülmüştür. Popülasyon genişliği değerinin küçük alınması, küçük boyutlu problemlerde daha iyi sonuçlar verirken, büyük boyutlu problemler için de bu durumun tersi olduğu yani popülasyon değerinin yüksek değerlerde alınmasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. En yüksek iterasyon sayısı ile kontrollü birey yüzdesi de etkinlik olarak popülasyon genişliğinden sonra gelmektedir. Başlangıç ve son sıcaklıkların ise daha çok çözüm süresi üzerinde etkileri görülmüştür.

Farklı parametreler kullanılarak elde edilen çözümlerde ortalama çözüm süresi en büyük boyutlu problemler için 7200 saniyeden 20 saniye gibi çok kısa bir süreye düşmüşse de amaç fonksiyonu değerleri kıyaslandığında çok etkin sonuçlara ulaşamadığı görülmektedir. GAMS ile elde edilen üst sınırlar ile yapılan karşılaştırmada yüzde fark olarak en düşük elde edilen sonuç; 30 adet talep noktası ve 12 adet aday tesis noktasının bulunduğu 2 no'lu problem için % 11.86'dır. Yüzde fark için ortalama değerler dikkate alındığında ise bu oran, 20 ila 30 talep noktalı problemlerde % 22-24'lerde iken; 35 ila 50

talep noktalı problemlerde %30-33'lere ve 100 adet talep noktası, 40 adet aday tesis noktası içeren en büyük boyutlu problemlerde ise %42'ye kadar yükseldiği görülmektedir.

Çizelge 4.2. Geliştirilen sezgisel yöntem sonuçlarının GAMS sonuçları ile karşılaştırması

Prob. Boyutu	Prob. sayı s	Ort. Dc	Üst Sınır Çözümlerin Ort.	Genetik Alg. Sonuçların Ort.	Üst sınır ile G.A. Arasındaki (%) Farkın Ort.	GAMS ile Ort. Çözüm Süresi (sn)	G.A. ile Ort. Çözüm Süresi (sn)	G.A. ile optimal bulan çözüm sayısı (%5)
5-2	10	7	9,1544	9,1952	0,3641	0,03	0,08	10
10-4	10	6	17,6889	18,2318	3,0154	1,10	0,13	6
15-6	10	9	31,0463	34,5786	11,4389	447,11	0,17	2
20 - 8	7	6	33,7690	39,1051	14,6199	991,11	0,25	1
20 – 8*	3	9	35,5186	43,3600	22,1069	7200	10,2	0
25 - 10	5	5	33,7158	39,0927	13,6557	623,03	0,49	3
25 –10*	5	10	50,6272	62,7944	24,6159	7200	9,71	0
30 - 12	2	4	45,8398	53,5567	17,0512	67,57	0,58	0
30 - 12*	8	9	59,9696	73,5776	23,9545	7200	9,62	0
35 - 14	1	3	46,8610	55,4871	18,4078	1672	0,73	0
35 - 14*	9	8	62,5827	81,2724	30,0557	7200	10,19	0
40 - 16	1	3	74,0438	87,4167	18,0608	0,41	0,58	0
40 - 16*	9	6	67,6809	88,8781	31,3485	7200	10,34	0
50 - 20*	9	7	97,2610	129,0980	33,1938	7200	10,5	0
100-40*	8	7	183,7449	260,5308	41,9922	7200	19,3	0

Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi GAMS-CPLEX ile kabul edilebilir bir süre dahilinde optimum çözüm elde edilebilen problem setleri ile 7200 saniye içinde optimum çözüme ulaşamayan problem setleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Çizelge 4.2’de “ * “ işaretli olan satırlardaki problemler, 7200 sn. içinde optimal sonuca ulaşamayan problem tipleridir.

Problem yapımızdan kaynaklı olarak milyon Euro biriminin kullanılması nedeniyle virgülden sonra dikkate alınan rakam sayısı fazla olduğundan Çizelge 4.2’deki en soldaki sütundaki değerler incelendiğinde; çözüm yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile matematiksel modelin sonuçları arasındaki fark, virgülden sonrası için 0,05’den küçük olanlarda da 0 olarak kabul edilmiştir.

Tüm problem setlerine genetik algoritma ve tavlama benzetimi ile geliştirdiğimiz karma bir çözüm yöntemi uygulanmıştır. Elde ettiğimiz çözümler değerlendirildiğinde, 0.05 kabul payı ile farklı boyutlarda 22 adet problem tipinde optimuma ulaşılabildiği ancak geri kalan 75 problem setinde problem boyutuna bağlı olarak artan bir hata oranıyla karşılaşıldığı görülmektedir. Çizelge 4.3’de ise küçük boyutlu problemlerde elde edilen sonuçların her problem için ayrı ayrı sonuçları görülmektedir. Bu tablonun devamı Ek-2’dir.

Çizelge 4.3. Küçük boyutlu problem setlerinde geliştirilen sezgisel çözüm yöntemi ile elde edilen sonuçlar

Problem Boyutu	Kapsama Mesafesi	A.F.değeri (Optimal)	CPU (GAMS)	G.A.değeri (Parametre 16)	(%) Hata Payı	CPU (G.A.)
5-2-1	4	10,0540	0,02	10,0540	0,000	0,18
5-2-2	5	4,7708	0,02	4,7708	0,000	0,12
5-2-3	10	8,4623	0,04	8,4799	0,208	0,08
5-2-4	2	1,9050	0,02	1,9050	0,002	0,09
5-2-5	4	7,8970	0,01	7,8970	0,000	0,02
5-2-6	8	12,3140	0,02	12,3140	0,000	0,02
5-2-7	11	13,3032	0,03	13,3032	0,000	0,08
5-2-8	10	8,7418	0,02	8,7418	0,000	0,09
5-2-9	11	12,7198	0,03	12,7206	0,006	0,06
5-2-10	8	11,3759	0,09	11,7656	3,426	0,08
ORT	7	9,1544	0,03	9,1952	0,364	0,08
10-4-1	2	6,4193	0,02	6,4193	0,000	0,18
10-4-2	10	24,2602	6,04	24,6970	1,800	0,15
10-4-3	8	23,2698	0,19	23,6735	1,735	0,05
10-4-4	7	24,1741	0,10	24,7675	2,455	0,10
10-4-5	5	16,9133	0,06	17,2313	1,880	0,13
10-4-6	2	5,3059	0,03	5,4057	1,881	0,19
10-4-7	7	18,4555	0,07	19,5922	6,156	0,17
10-4-8	7	15,1809	0,03	16,4807	8,562	0,15
10-4-9	9	20,0355	4,44	21,1563	5,594	0,05
10-4-10	6	22,8744	0,03	22,8944	0,087	0,17
ORT	6	17,6889	1,10	18,2318	3,015	0,13

5. SONUÇ

DEK sistemlerinden maksimum faydanın sağlanabilmesi için üretim birimlerinin optimal yerleşimi ve üretim teknolojilerinin optimal birleşimi çok önemlidir. Bu tez çalışmasında Bölgesel Isıtma/Soğutma Ağlarını da içeren lokal enerji üretim sistemlerinin tasarım ve planlaması ayrıntılı teknik analizlere inilmeden, endüstri mühendisliği bakış açısıyla, yüksek enerji etkinliğine sahip DEKlerin mevcut talepleri karşılama temeline dayalı tesis yeri seçimi problemi olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmadaki DEKlerin enerjiyi tüketen binalar dışında konumlandırıldığı ve üretilen enerjinin enerji dağıtım ağları aracılığıyla talep noktalarına ulaştırıldığı varsayıldığından model mahalli ya da bölgesel ölçekli (district-scale) sınıfına dahil edilmiştir [40]. Son kullanıcıların enerji talepleri karşılanırken öncelikle, tesis ile kullanıcı arasındaki mesafe göz önünde bulundurulmuş ve model izin verilen müşteri – tesis arası mesafe (kapsama mesafesi) temelinde kurulmuştur.

Yapılan incelemeler ışığında Bölgesel Isıtma Soğutma Ağlarının kurulum maliyetleri, bölgesel enerji sistem maliyetlerinin neredeyse yarısını oluşturduğu görülmüştür [43]. Ne kadar az boru hattına ihtiyaç duyulursa maliyetler ve kayıplar o kadar azalacağından geliştirilen bu modelde diğer çalışmalardan farklı olarak, tesisler ve müşteriler arası mesafenin modele önceden girilen kapsama mesafesi dâhilinde olması şartı getirilmiştir. Neticede bu model ile aday enerji üretim tesisleri arasından seçilecek tesisin ilgili talep noktasına önceden belirlenen kapsama mesafesinden daha uzak bir noktadan atanması ihtimali kaldırılmıştır. Daha kısa bir ifadeyle bir talep noktasının bir aday tesis noktasına atanabilmesi için aralarındaki mesafenin modele önceden girilen kapsama mesafesinden daha fazla olmaması gerekmektedir.

Kurulan model ile toplam maliyetin en küçüklenmesi amacı altında açılacak tesisin boyut ve tipine göre ilk yatırım maliyetleri ve enerji dağıtım ağının maliyeti de modele talep ağırlıklı taşıma maliyeti olarak ilave edilmiştir. Bu amaçla maksimum kapsama mesafesinin de göz önünde bulundurulduğu *Azami Kapsama Mesafesi Eklemeli Kapasiteli Sabit Maliyetli Tesis Yer Seçimi Modeli* geliştirilmiş ayrıca modelde iletim kayıpları da dikkate alınmıştır. Modelin çıktısı olarak son kullanıcının talep türüne göre hangi tesise

atandığı bilgisi ile birlikte kurulacak dağıtım ağının yapısı, açılacak tesis sayısı ve tesis tipi (kojenerasyon/Trijenerasyon) ve tesis boyutu belirlenmiştir.

Modelin sayısal uygulaması, 20 müşterili bir örnek üzerinde farklı kapsama mesafeleri ile yapılmıştır. Ayrıca GAMS ile geliştirilen matematiksel modelin sınırlarının belirlenmesi amacıyla farklı parametre aralıkları için 100 adet test problemi oluşturulmuştur. Bu testin sonucunda problem boyutu ve kapsama mesafesinin çözüm zamanı üzerinde etkili olduğu ve parametrelere özgü istisnai durumlar dışında, boyut ve kapsama mesafesi arttıkça ortalama çözüm süresinin arttığı, en iyi çözüme ulaşılan (alt sınır ile üst sınır değerlerinin aynı olduğu) problem sayısının azaldığı görülmüştür. Optimali bulamayan en küçük boyutlu problem seti için ortalama yüzde fark %0.92 iken; orta boyutlu problemlerde %4,3 ve en büyük boyutlu problem seti için ise %12 olduğu görülmüştür.

Model, geleneksel tesis yer seçimi ve atama problemi yapısında geliştirildiğinden, NP-Zor yapıdadır. Bu tür problemlerin karmaşık yapıları nedeniyle geleneksel çözüm yöntemleri ile çözüm süreleri oldukça uzun olduğundan daha kısa çözüm süresinde optimuma yakın çözümler elde etmek amacıyla Genetik Algoritma ile Tavlama Benzetiminin melezlendiği bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir.

Geliştirilen sezgisel yöntemin çözüm süresini 7200 saniyeden ortalama 20 saniyeye düşürdüğü görülmüşse de elde edilen sonuçların GAMS ile elde edilen sonuçlara kıyasla etkin olmadığı toplamda 97 problem seti arasından ancak 22 adetinde 0,05'lik kabul payıyla optimal sonucun elde edilebildiği görülmüştür. Sonuç olarak; matematiksel modelin uygulama alanına farklı bir yaklaşım getirdiği ve problemin stratejik karar içeren bir yapıda olduğu düşünülerek GAMS ile büyük boyutlu problemlerin 7200 saniyeden daha uzun bir süre çalıştırıldığında geleneksel model ile daha etkin çözümlere ulaşılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: COGEN European Association for the Promotion of Cogeneration. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.code-project.eu%2Fwp-content%2Fuploads%2F2010%2F12%2FCODE-CS-Directory.pdf&date=2016-06-14>, Son Erişim Tarihi: 01.10.2011.
2. İnternet: Derbentli, T. Bileşik ısı-güç üretimin küçük ölçeklerde uygulanabilirliği. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.dektmk.org.tr%2Fpresimler%2Fenerjikongresi12%2F44-TanerDerbentli.pdf&date=2016-06-14>, Son Erişim Tarihi: 01.01.2016.
3. İnternet: Birleşik Enerji Üretim Modeli. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tresenerji.com.tr%2Ftr%2Fbirlesik%2Furetim%2Bmodeli%2Bdegerlendirmesi.html&date=2016-06-14>, Son Erişim Tarihi: 01.05.2015.
4. Ortiga, J., Bruno, J.C.and Coronas, A. (2013). Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network. *Applied Thermal Engineering*, 50(2), 1536-1542.
5. İnternet: Elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.teias.gov.tr%2Fyukdagitim%2Fkuruluguc.xls&date=2016-06-14>, Son Erişim Tarihi: 30.04.2016.
6. İnternet: Türkiye'de Elektrik Üretimi-2015. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.emo.org.tr%2Fekler%2F33e504b88298309_ek.pdf&date=2016-06-14, Son Erişim Tarihi: 14.06.2016
7. İnternet: Ocak 2015 İtibarıyla Türkiye'nin Enerji Görünümü Raporu. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.mmo.org.tr%2Fresimler%2Fdosya_ekler%2Fa5a69d7ec06d9cd_ek.pdf%3Fdergi%3D1522&date=2016-06-14, Son Erişim Tarihi: 01.02.2015.
8. İnternet: Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.csb.gov.tr%2Fturkce%2Findex.php%3FSayfa%3DSayfa%26Tur%3Dmevzuat%26Id%3D122&date=2016-06-14>, Son Erişim Tarihi: 05.12.2008.
9. İnternet: IEA - International Energy Agency. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.iea.org%2Fstatistics%2F&date=2016-06-16>, Son Erişim Tarihi: 01.01.2014.
10. İnternet: Eurostat yearbook URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fec.europa.eu%2Feurostat%2Fstatistics_explained%2Findex.php%2FElectricity_production%2C_consumption_and_market_overview&date=2016-06-14, Son Erişim Tarihi: 29.06.2015.

11. Lozano, M.A., Ramos, J.C. and 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.
12. Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B.V. and Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4), 1059-1082.
13. Wouters, C., Fraga, E.S. and James, A.M. (2015). An energy integrated, multi-microgrid, MILP (mixed-integer linear programming) approach for residential distributed energy system planning - A South Australian case-study. *Energy*, 85, 30-44.
14. Soderman, J. and Pettersson, F. (2006). Structural and operational optimisation of distributed energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 26(13), 1400-1408.
15. Ren, H.B. and Gao, W.J. (2010). A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems. *Applied Energy*, 87(3), 1001-1014.
16. Mehleri, E.D., Sarimveis, H., Markatos, N.C. and Papageorgiou, L.G. (2012). A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level. *Energy*, 44(1), 96-104.
17. Mehleri, E.D., Sarimveis, H., Markatos, N.C. and Papageorgiou, L.G. (2013). Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. *Renewable Energy*, 51, 331-342.
18. Luz-Silveira, J., Beyene, A., Leal, E.M., Santana, J.A. and Okada, D. (2002). Thermoeconomic analysis of a cogeneration system of a university campus. *Applied Thermal Engineering*, 22(13), 1471-1483.
19. Silveira, J. and Tuna, C. (2003). Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I. *Progress in energy and Combustion Science*, 29(6), 479-485.
20. Cormio, C., Dicorato, M., Minoia, A. and Trovato, M. (2003). A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7(2), 99-130.
21. Yiğit, A.H.S.A. (2004). Otoprodüktör Uygulaması. *TMMOB Elektrik Mühendisleri Dergisi*, 411, 1-10.
22. Kıncay, O. and Yumurtacı, Z. (2006). Bir Üniversite Kampüsü için Uygun Enerji Sisteminin Seçimi. *Tesisat Mühendisliği*, 95.
23. Liu, P., Gerogiorgis, D.I. and Pistikopoulos, E.N. (2007). Modeling and optimization of polygeneration energy systems. *Catalysis Today*, 127(1-4), 347-359.

24. Obara, S.y. (2007). Equipment arrangement planning of a fuel cell energy network optimized for cost minimization. *Renewable energy*, 32(3), 382-406.
25. Weber, C., Maréchal, F.and Favrat, D. (2007). Design and optimization of district energy systems. *Computer Aided Chemical Engineering*, 24, 1127-1132.
26. Arteconi, A., Brandoni, C.and Polonara, F. (2009). Distributed generation and trigeneration: Energy saving opportunities in Italian supermarket sector. *Applied Thermal Engineering*, 29(8), 1735-1743.
27. Chicco, G.and Mancarella, P. (2009). Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization. *Energy*, 34(3), 261-273.
28. Cai, Y.P., Huang, G.H., Yang, Z.F.and Tan, Q. (2009). Identification of optimal strategies for energy management systems planning under multiple uncertainties. *Applied Energy*, 86(4), 480-495.
29. Cai, Y., Huang, G.H., Lin, Q., Nie, X.and Tan, Q. (2009). An optimization-model-based interactive decision support system for regional energy management systems planning under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 3470-3482.
30. Wang, J., Zhai, Z.J., Jing, Y.and Zhang, C. (2010). Optimization design of BCHP system to maximize to save energy and reduce environmental impact. *Energy*, 35(8), 3388-3398.
31. Kavvadias, K.C., Tosios, A.P.and Maroulis, Z.B. (2010). Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 833-845.
32. Khalesi, N., Rezaei, N.and Haghifam, M.R. (2011). DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(2), 288-295.
33. Carvalho, M., Serra, L.M.and Lozano, M.A. (2011). Geographic evaluation of trigeneration systems in the tertiary sector. Effect of climatic and electricity supply conditions. *Energy*, 36(4), 1931-1939.
34. Weber, C.and Shah, N. (2011). Optimisation based design of a district energy system for an eco-town in the United Kingdom. *Energy*, 36(2), 1292-1308.
35. Ortiga, J., Bruno, J.C.and Coronas, A. (2011). Selection of typical days for the characterisation of energy demand in cogeneration and trigeneration optimisation models for buildings. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1934-1942.
36. Carvalho, M., Lozano, M.A., Serra, L.M.and Wohlgemuth, V. (2012). Modeling simple trigeneration systems for the distribution of environmental loads. *Environmental Modelling & Software*, 30, 71-80.

37. Bracco, S., Dentici, G. and 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.
38. Omu, A., Choudhary, R. and Boies, A. (2013). Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming. *Energy Policy*, 61, 249-266.
39. Yang, Y., Zhang, S.J. and Xiao, Y.H. (2015). Optimal design of distributed energy resource systems coupled with energy distribution networks. *Energy*, 85, 433-448.
40. Yang, Y., Zhang, S.J. and Xiao, Y.H. (2015). An MILP (mixed integer linear programming) model for optimal design of district-scale distributed energy resource systems. *Energy*, 90, 1901-1915.
41. Bracco, S., Dentici, G. and Siri, S. (2016). DESOD : A mathematical programming tool to optimally design a distributed energy system. *Energy*, 100, 298-309.
42. Ameri, M. and Besharati, Z. (2016). Optimal design and operation of district heating and cooling networks with CCHP systems in a residential complex. *Energy and Buildings*, 110, 135-148.
43. Internet: UNEP District Energy in Cities Report. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.unep.org%2Fenergy%2Fportals%2F50177%2FDES_District_Energy_Report_full_02_d.pdf&date=2016-06-22, Son Erişim Tarihi: 01.01.2015.
44. Daskin, M.S. (2008). What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics*, 55(4), 283-294.
45. Church, R. and Velle, C.R. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in regional science*, 32(1), 101-118.
46. Megiddo, N., Zemel, E. and Hakimi, S.L. (1983). The maximum coverage location problem. *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods*, 4(2), 253-261.
47. Daskin, M.S., Hogan, K. and ReVelle, C. (1988). Integration of multiple, excess, backup, and expected covering models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 15(1), 15-35.
48. Schilling, D.A., Jayaraman, V. and Barkhi, R. (1993). A review of covering problems in facility location. *Computers & Operations Research*, 121-128.
49. Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C. and Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations Research*, 19(6), 1363-1373.
50. Berman, O. and Krass, D. (2002). The generalized maximal covering location problem. *Computers & Operations Research*, 29(6), 563-581.
51. S., D.M. (1995). *Network and Discrete Location Theory* (3th). New York: John Wiley & Sons, INC., 23-47.

52. Hakimi, S.L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations research*, 12(3), 450-459.
53. Watson-Gandy, C. (1982). Heuristic procedures for the m-partial cover problem on a plane. *European Journal of Operational Research*, 11(2), 149-157.
54. Balinski, M.L. (1965). Integer programming: methods, uses, computations. *Management Science*, 12(3), 253-313.
55. Nozick, L.K. (2001). The fixed charge facility location problem with coverage restrictions. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 37(4), 281-296.
56. Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence* U Michigan Press, 120-175.

EKLER

EK-1. Test problemlerinin GAMS sonuçları

Problem boyutu	Dc (Azami kapsama mesafesi)	Amaç fonksiyonu değeri (alt sınır)	Süre (sn)	Üst sınır	Mutlak Fark (alt sınır- üst sınır)	Nispi Fark (mutlak fark /alt sınır)	Yüzde sapma (mutlak fark/üst sınır)*100	İterasyon sayısı	Düğüm sayısı
5-2-1	4	10,0540	0,02	10,0540	0,0000	0,0000	0,00	0	0
5-2-2	5	4,7708	0,02	4,7708	0,0000	0,0000	0,00	0	0
5-2-3	10	8,4623	0,04	8,4623	0,0000	0,0000	0,00	186	35
5-2-4	2	1,9050	0,02	1,9050	0,0000	0,0000	0,00	0	0
5-2-5	4	7,8970	0,01	7,8970	0,0000	0,0000	0,00	0	0
5-2-6	8	12,3140	0,02	12,3140	0,0000	0,0000	0,00	0	0
5-2-7	11	13,3032	0,03	13,3032	0,0000	0,0000	0,00	14	0
5-2-8	10	8,7418	0,02	8,7418	0,0000	0,0000	0,00	3	0
5-2-9	11	12,7198	0,03	12,7198	0,0000	0,0000	0,00	40	0
5-2-10	8	11,3759	0,09	11,3759	0,0000	0,0000	0,00	41	0
ORT	7	9,1544	0,03	9,1544	0,0000	0,0000	0,00	28	4
10-4-1	2	6,4193	0,02	6,4193	0,0000	0,0000	0,00	0	0
10-4-2	10	24,2602	6,04	24,2602	0,0000	0,0000	0,00	154551	8772
10-4-3	8	23,2698	0,19	23,2698	0,0000	0,0000	0,00	3933	423
10-4-4	7	24,1741	0,10	24,1741	0,0000	0,0000	0,00	1456	100
10-4-5	5	16,9133	0,06	16,9133	0,0000	0,0000	0,00	432	37
10-4-6	2	5,3059	0,03	5,3059	0,0000	0,0000	0,00	50	0
10-4-7	7	18,4555	0,07	18,4555	0,0000	0,0000	0,00	530	10
10-4-8	7	15,1809	0,03	15,1809	0,0000	0,0000	0,00	59	0
10-4-9	9	20,0355	4,44	20,0355	0,0000	0,0000	0,00	113657	5955

10-4-10	6	22,8744	0,03	22,8744	0,0000	0,0000	0,00	72	2
ORT	6	17,6889	1,10	17,6889	0,0000	0,0000	0,00	27474	1530
15-6-1	7	38,5081	0,50	38,5081	0,0000	0,0000	0,00	8966	1093
15-6-2	11	34,0506	161,30	34,0506	0,0000	0,0000	0,00	2417961	82044
15-6-3	9	31,6489	2,62	31,6489	0,0000	0,0000	0,00	59598	2319
15-6-4	11	29,4853	897,40	29,4853	0,0000	0,0000	0,00	12856356	403018
15-6-5	9	31,5190	204,60	31,5190	0,0000	0,0000	0,00	4494427	244274
15-6-6	10	26,1692	443,00	26,1692	0,0000	0,0000	0,00	6547005	318087
15-6-7	9	31,6646	21,43	31,6646	0,0000	0,0000	0,00	409220	10359
15-6-8	5	22,3068	0,04	22,3068	0,0000	0,0000	0,00	156	4
15-6-9	7	32,1839	0,19	32,1839	0,0000	0,0000	0,00	877	44
15-6-10	12	32,9268	2740,00	32,9268	0,0000	0,0000	0,00	26882786	949461
ORT	9	31,0463	447,11	31,0463	0,0000	0,0000	0,00	5367735	201070
20-8-1	9	36,2983	7200,00	34,8479	1,4504	0,0400	4,16	51351607	1376369
20-8-2	8	37,1787	7200,00	36,2850	0,8937	0,0240	2,46	57031550	1545085
20-8-3	7	42,0073	364,00	42,0073	0,0000	0,0000	0,00	3877833	101127
20-8-4	10	36,8536	3614,00	36,8536	0,0000	0,0000	0,00	22728038	787673
20-8-5	6	29,1691	877,00	29,1691	0,0000	0,0000	0,00	8645707	297020
20-8-6	8	39,0241	514,00	39,0241	0,0000	0,0000	0,00	5010062	125502
20-8-7	2	17,2599	0,04	17,2599	0,0000	0,0000	0,00	22	0
20-8-8	7	31,4237	1567,00	31,4237	0,0000	0,0000	0,00	18356000	718199
20-8-9	10	36,3460	7200,00	35,4229	0,9231	0,0254	2,61	39078684	675627
20-8-10	5	40,6455	1,73	40,6455	0,0000	0,0000	0,00	43858	1644
ORT	7	34,6206	2853,78	34,2939	0,3267	0,0089	0,92	20612336	562825

25-10-1	2	27,0300	0,08	27,0300	0,0000	0,0000	0,00	65	0
25-10-2	8	46,9729	7200,00	45,8286	1,1443	0,0244	2,50	46924504	747544
25-10-3	2	29,9281	0,04	29,9281	0,0000	0,0000	0,00	39	0
25-10-4	11	41,7357	3030,00	41,7357	0,0000	0,0000	0,00	12732380	209904
25-10-5	11	60,4371	7200,00	58,2210	2,2161	0,0367	3,81	28837278	496732
25-10-6	9	51,6689	7200,00	50,3783	1,2906	0,0250	2,56	30910177	370395
25-10-7	3	32,9208	0,05	32,9208	0,0000	0,0000	0,00	258	0
25-10-8	10	48,1987	7200,00	46,6543	1,5444	0,0320	3,31	33119561	443646
25-10-9	5	36,9642	85,00	36,9642	0,0000	0,0000	0,00	837608	15961
25-10-10	11	54,3771	7200,00	52,0537	2,3234	0,0427	4,46	29662380	532494
ORT	7	43,0234	3911,52	42,1715	0,8519	0,0161	1,66	18302425	281668
30-12-1	11	71,5305	7200,00	67,8163	3,7142	0,0519	5,48	25216481	445686
30-12-2	5	66,9816	7200,00	66,9816	0,0000	0,0000	0,00	50800235	1273711
30-12-3	3	48,0610	0,13	48,0610	0,0000	0,0000	0,00	547	24
30-12-4	10	64,7597	7200,00	60,0460	4,7137	0,0728	7,85	28339256	532348
30-12-5	5	50,8469	7200,00	50,0992	0,7477	0,0147	1,49	53319829	1284545
30-12-6	6	49,3715	7200,00	47,1064	2,2651	0,0459	4,81	43686139	532768
30-12-7	11	63,2808	7200,00	60,4529	2,8279	0,0447	4,68	25709603	379410
30-12-8	11	77,2267	7200,00	74,2122	3,0145	0,0390	4,06	28339045	368882
30-12-9	9	55,3188	7200,00	53,0420	2,2769	0,0412	4,29	25768418	256792
30-12-10	4	43,6185	135,00	43,6185	0,0000	0,0000	0,00	1418811	36550
ORT	8	59,0996	5773,513	57,1436	1,9560	0,0310	3,27	28259836	511072
35-14-1	10	63,8339	7200,00	59,3302	4,5037	0,0706	7,59	24335318	326353
35-14-2	6	56,6552	7200,00	56,0623	0,5929	0,0105	1,06	32218056	393074

35-14-3	9	82,9040	7200,00	77,9932	4,9108	0,0592	6,30	22670292	309866
35-14-4	4	57,2646	7200,00	56,1277	1,1369	0,0199	2,03	55533902	1078114
35-14-5	3	46,8610	1672,00	46,8610	0,0000	0,0000	0,00	33350	759
35-14-6	7	74,8680	7200,00	70,7696	4,0984	0,0547	5,79	31556460	503374
35-14-7	8	72,7002	7200,00	68,6710	4,0292	0,0554	5,87	25349686	363594
35-14-8	5	59,4995	7200,00	58,7266	0,7729	0,0130	1,32	39077648	653333
35-14-9	11	58,9463	7200,00	54,8106	4,1357	0,0702	7,55	24735320	483831
35-14-10	10	63,2326	7200,00	60,7526	2,4800	0,0392	4,08	23449254	294149
ORT	7	63,6765	6647,2	61,0105	2,6660	0,0393	4,16	27895929	440645
40-16-1	7	66,6975	7200,00	62,0580	4,6395	0,0696	7,48	26237182	321472
40-16-2	6	63,8014	7200,00	59,5164	4,2850	0,0672	7,20	30332660	421814
40-16-3	6	79,6592	7200,00	76,3705	3,2887	0,0413	4,31	30875640	447964
40-16-4	3	74,0438	0,41	74,0438	0,0000	0,0000	0,00	1188	29
40-16-5	9	82,4402	7200,00	75,1123	7,3279	0,0889	9,76	24004956	398345
40-16-6	5	71,5602	7200,00	67,2745	4,2857	0,0599	6,37	28834414	303731
40-16-7	2	38,3880	0,07	38,3880	0,0000	0,0000	0,00	177	22
40-16-8	4	68,2461	7200,00	67,6442	0,6019	0,0088	0,89	48425994	734301
40-16-9	6	69,6762	7200,00	66,4613	3,2149	0,0461	4,84	25966937	251387
40-16-10	6	67,8036	7200,00	65,7841	2,0195	0,0298	3,07	28538951	377685
ORT	5	68,2316	5760,0481	65,2653	2,9663	0,0412	4,39	24321810	325675
50-20-1	8	104,9054	7200,00	98,3548	6,5506	0,0624	6,66	23074016	321808
50-20-2	9	102,3607	7200,00	91,2049	11,1558	0,1090	12,23	19517999	218417
50-20-3	5	96,6205	7200,00	89,5900	7,0305	0,0728	7,85	26954135	270356
50-20-4	3	99,6973	7200,00	99,4684	0,2289	0,0023	0,23	47906608	1730936
50-20-5	9	106,1057	7200,00	97,2870	8,8187	0,0831	9,06	21420664	322956

50-20-6	10	112,7410	7200,00	105,4953	7,2457	0,0643	6,87	20688361	375371
50-20-7	6	107,0193	7200,00	99,6360	7,3833	0,0690	7,41	26445792	379191
50-20-8	9	101,4320	7200,00	92,7071	8,7249	0,0860	9,41	20122762	355661
50-20-9	7	110,3838	7200,00	101,6055	8,7783	0,0795	8,64	25243126	434073
50-20-10	12	110,9498	7200,00	99,4538	11,4960	0,1036	11,56	21879233	321004
ORT	8	105,2216	7200,0000	97,4803	7,7413	0,0732	7,99	25325270	472977
100-40-1	7	218,9882	7200,00	199,0609	19,9273	0,0910	10,01	11007057	210393
100-40-2	7	204,5902	7200,00	179,0293	25,5609	0,1249	14,28	9435816	150613
100-40-3	8	193,8331	7200,00	176,9375	16,8956	0,0872	9,55	12264487	269323
100-40-5	8	197,9578	7200,00	181,6226	16,3352	0,0825	8,99	8299996	146747
100-40-6	7	244,5303	7200,00	214,2248	30,3055	0,1239	14,15	12871349	253464
100-40-7	4	193,3276	7200,00	173,6691	19,6585	0,1017	11,32	19349121	228577
100-40-8	6	177,5625	7200,00	163,3084	14,2541	0,0803	8,73	13347401	140885
100-40-9	8	199,4048	7200,00	167,4678	31,9370	0,1602	19,07	7867652	153393
100-40-10	10	203,8949	7200,00	182,1065	21,7884	0,1069	11,96	7148422	146294
ORT	7	203,7877	7200,0000	181,9363	21,8514	0,1065	12,01	11287922	188854

Problem Boyutu	Kapsama Mesafesi	A. F. değeri (Optimal)	CPU (GAMS)	G. A.değeri (Parametre 16)	Yüzde (%) Hata Payı	CPU (G.A.)
5-2-1	4	10,0540	0,02	10,0540	0,0002	0,18
5-2-2	5	4,7708	0,02	4,7708	0,0001	0,12
5-2-3	10	8,4623	0,04	8,4799	0,2081	0,08
5-2-4	2	1,9050	0,02	1,9050	0,0017	0,09
5-2-5	4	7,8970	0,01	7,8970	0,0005	0,02
5-2-6	8	12,3140	0,02	12,3140	0,0004	0,02
5-2-7	11	13,3032	0,03	13,3032	0,0001	0,08
5-2-8	10	8,7418	0,02	8,7418	0,0000	0,09
5-2-9	11	12,7198	0,03	12,7206	0,0061	0,06
5-2-10	8	11,3759	0,09	11,7656	3,4257	0,08
ORT	7	9,1544	0,03	9,1952	0,3641	0,08
10-4-1	2	6,4193	0,02	6,4193	0,0007	0,18
10-4-2	10	24,2602	6,04	24,6970	1,8004	0,15
10-4-3	8	23,2698	0,19	23,6735	1,7348	0,05
10-4-4	7	24,1741	0,10	24,7675	2,4546	0,10
10-4-5	5	16,9133	0,06	17,2313	1,8800	0,13
10-4-6	2	5,3059	0,03	5,4057	1,8807	0,19
10-4-7	7	18,4555	0,07	19,5922	6,1589	0,17
10-4-8	7	15,1809	0,03	16,4807	8,5622	0,15
10-4-9	9	20,0355	4,44	21,1563	5,5940	0,05
10-4-10	6	22,8744	0,03	22,8944	0,0873	0,17
ORT	6	17,6889	1,10	18,2318	3,0154	0,13
15-6-1	7	38,5081	0,50	38,9989	1,2744	0,14

15-6-2	11	34,0506	161,30	37,2633	9,4352	0,15
15-6-3	9	31,6489	2,62	36,9201	16,6551	0,21
15-6-4	11	29,4853	897,40	34,9697	18,6004	0,15
15-6-5	9	31,5190	204,60	33,8835	7,5017	0,17
15-6-6	10	26,1692	443	30,6973	17,3031	0,20
15-6-7	9	31,6646	21,43	37,3721	18,0248	0,23
15-6-8	5	22,3068	0,04	22,5167	0,9410	0,28
15-6-9	7	32,1839	0,19	34,9515	8,5994	0,08
15-6-10	12	32,9268	2740	38,2128	16,0538	0,15
ORT	9	31,0463	447,11	34,5786	11,4389	0,17
20-8-3	7	42,0073	364	48,0447	14,3722	0,13
20-8-4	10	36,8536	3614	49,5268	34,3879	0,32
20-8-5	6	29,1691	877	34,5914	18,5893	0,40
20-8-6	8	39,0241	514	43,9632	12,6567	0,13
20-8-7	2	17,2599	0,04	17,2642	0,0247	0,42
20-8-8	7	31,4237	1567	34,1189	8,5771	0,14
20-8-10	5	40,6455	1,73	46,2267	13,7315	0,17
ORT	6	33,7690	991,11	39,1051	14,6199	0,25
25-10-1	2	27,0300	0,08	27,0319	0,0070	0,57
25-10-3	2	29,9281	0,04	29,9281	0,0001	0,58
25-10-4	11	41,7357	3030	56,3570	35,0330	0,26
25-10-7	3	32,9208	0,05	33,1209	0,6080	0,58
25-10-9	5	36,9642	85	49,0257	32,6303	0,48
ORT	5	33,7158	623,03	39,0927	13,6557	0,49

30-12-3	3	48,0610	0,13	54,1076	12,5811	0,59
30-12-10	4	43,6185	135	53,0058	21,5213	0,58
ORT	4	45,8398	67,57	53,5567	17,0512	0,58
35-14-5	3	46,8610	1672	55,4871	18,4078	0,73
40-16-4	3	74,0438	0,41	87,4167	18,0608	0,58

EK-3. Sezgisel çözüm yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırması – II

		GAMS Sonuçları			G.A. değerleri			G.A. ile GAMS arasındaki (%) Fark			G.A. ile farklı parametrelerde çalışma süresi		
Problem Boyutu	Dc	A,F,değeri	Üst Sınır	CPU (sn)	Parametre 6	Parametre 19	Parametre 22	Yüzde Hata (par 6)	Yüzde Hata (par 19)	Yüzde Hata (par 22)	CPU (Par 6)	CPU (Par 19)	CPU (Par 22)
20-8-1	9	36,2983	34,8479	7200,00	44,00946	43,75102	43,75102	26,2901	25,5485	25,5485	1,51	10,44	19,47
20-8-2	8	37,1787	36,2850	7200,00	43,97558	42,62781	43,85300	21,1949	17,4805	20,8571	1,38	10,28	18,19
20-8-9	10	36,3460	35,4229	7200,00	42,09498	43,96529	43,73381	18,8355	24,1155	23,4620	1,36	10,41	18,74
ORT	9	36,6077	35,5186	7200,00	43,3600	43,4480	43,7793	22,1069	22,3815	23,2892	1,42	10,38	18,80
25-10-2	8	46,9729	45,8286	7200,00	58,00853	57,72907	57,42227	26,5771	25,9673	25,2979	1,25	10,14	18,14
25-10-5	11	60,4371	58,2210	7200,00	69,60397	66,06436	71,24775	19,5513	13,4717	22,3747	1,04	9,67	16,67
25-10-6	9	51,6689	50,3783	7200,00	69,51102	66,26175	66,06676	37,9781	31,5284	31,1413	1,44	10,74	19,41
25-10-8	10	48,1987	46,6543	7200,00	62,81336	63,22428	62,44515	34,6357	35,5165	33,8465	1,22	10,31	18,06
25-10-10	11	54,3771	52,0537	7200,00	60,76903	60,69236	60,52010	16,7430	16,5957	16,2647	1,05	9,83	16,71
ORT	9	52,3309	50,6272	7200,00	64,1412	62,7944	63,5404	27,0971	24,6159	25,7850	1,20	10,14	17,80
30-12-1	11	71,5305	67,8163	7200,00	79,33805	77,98541	77,98541	16,9897	14,9951	14,9951	1,11	9,97	16,60
30-12-2	5	66,9816	66,9816	7200,00	76,42498	74,92243	76,77502	14,0985	11,8552	14,6211	1,12	9,79	16,57
30-12-4	10	64,7597	60,0460	7200,00	74,96784	73,79764	73,47430	24,8506	22,9018	22,3633	1,08	9,47	17,41
30-12-5	5	50,8469	50,0992	7200,00	69,53689	68,54002	69,05277	38,7985	36,8087	37,8322	1,54	11,02	19,06
30-12-6	6	49,3715	47,1064	7200,00	59,44230	64,70605	66,08195	26,1873	37,3615	40,2824	1,67	11,44	19,94
30-12-7	11	63,2808	60,4529	7200,00	77,15165	77,40657	77,08109	27,6227	28,0444	27,5060	1,05	9,90	16,76
30-12-8	11	77,2267	74,2122	7200,00	85,68692	85,93763	85,93654	15,4621	15,7999	15,7985	1,09	9,79	17,07
30-12-9	9	55,3188	53,0420	7200,00	66,07188	65,70263	68,32695	24,5653	23,8692	28,8168	1,11	9,84	16,62

ORT	9	62,4146	59,9696	7200,00	73,5776	73,6248	74,3393	23,5719	23,9545	25,2769	1,22	10,15	17,50
35-14-1	10	63,8339	59,3302	7200,00	87,76224	82,95342	84,39398	47,9217	39,8165	42,2446	1,56	11,79	19,95
35-14-2	6	56,6552	56,0623	7200,00	75,78826	77,00420	76,87886	35,1857	37,3546	37,1310	1,71	11,63	19,88
35-14-3	9	82,9040	77,9932	7200,00	105,51732	102,97558	99,85872	35,2904	32,0315	28,0352	1,35	10,86	17,73
35-14-4	4	57,2646	56,1277	7200,00	69,22137	68,86768	70,30515	23,3284	22,6982	25,2593	1,37	10,25	18,21
35-14-6	7	74,8680	70,7696	7200,00	87,90705	87,84977	85,53071	24,2158	24,1349	20,8580	1,18	10,03	17,62
35-14-7	8	72,7002	68,6710	7200,00	81,54569	81,18335	81,47983	18,7483	18,2206	18,6524	1,16	10,05	16,73
35-14-8	5	59,4995	58,7266	7200,00	73,90854	73,99371	74,77351	25,8519	25,9969	27,3248	1,38	10,53	18,49
35-14-9	11	58,9463	54,8106	7200,00	69,66184	69,72384	69,54470	27,0955	27,2086	26,8818	1,15	9,83	17,10
35-14-10	10	63,2326	60,7526	7200,00	90,55956	86,90029	89,60814	49,0628	43,0396	47,4968	1,73	12,00	19,89
ORT	8	65,5449	62,5827	7200,00	82,4302	81,2724	81,3748	31,8556	30,0557	30,4315	1,40	10,77	18,40
40-16-1	7	66,6975	62,0580	7200,00	79,76439	81,25557	81,13297	28,5320	30,9349	30,7373	1,21	10,57	17,63
40-16-2	6	63,8014	59,5164	7200,00	77,21362	75,07084	74,31825	29,7350	26,1347	24,8702	1,25	10,66	17,72
40-16-3	6	79,6592	76,3705	7200,00	95,31233	97,28141	99,69805	24,8025	27,3808	30,5452	1,31	10,54	17,34
40-16-5	9	82,4402	75,1123	7200,00	95,64403	94,32872	94,90209	27,3347	25,5836	26,3469	1,24	10,01	17,62
40-16-6	5	71,5602	67,2745	7200,00	97,59157	96,97426	94,10346	45,0647	44,1471	39,8798	1,86	12,23	20,43
40-16-7	8	72,3905	68,9071	7200,00	87,09266	85,30246	84,90361	26,3915	23,7935	23,2146	1,25	10,50	17,66
40-16-8	4	68,2461	67,6442	7200,00	87,04581	90,99977	89,62240	28,6818	34,5271	32,4909	2,01	12,44	21,44
40-16-9	6	69,6762	66,4613	7200,00	94,62575	93,83885	92,21492	42,3773	41,1933	38,7499	1,53	11,21	18,88
40-16-10	6	67,8036	65,7841	7200,00	88,60247	91,60248	89,00700	34,6867	39,2471	35,3016	1,37	10,75	18,50
ORT	6	71,3639	67,6809	7200,00	89,2103	89,6283	88,8781	31,9563	32,5491	31,3485	1,45	10,99	18,58
50-20-1	8	104,9054	98,3548	7200,00	134,29585	137,61945	133,42788	36,5423	39,9215	35,6598	1,56	11,08	18,84
50-20-2	9	102,3607	91,2049	7200,00	149,85140	151,86605	151,94509	64,3020	66,5109	66,5976	1,57	11,81	18,57
50-20-3	5	96,6205	89,5900	7200,00	116,45075	116,81112	116,59836	29,9819	30,3842	30,1467	1,45	11,20	18,70

50-20-4	3	99,6973	99,4684	7200,00	122,46418	116,57459	118,09862	23,1187	17,1976	18,7298	1,53	11,28	17,75
50-20-5	9	106,1057	97,2870	7200,00	129,87474	134,63631	131,30015	33,4965	38,3908	34,9616	1,42	11,11	18,89
50-20-6	10	112,7410	105,4953	7200,00	126,03334	127,30540	126,05513	19,4682	20,6740	19,4888	1,56	11,60	19,19
50-20-7	6	107,0193	99,6360	7200,00	133,14625	133,16080	131,02637	33,6327	33,6473	31,5051	1,46	11,50	18,20
50-20-8	9	101,4320	92,7071	7200,00	124,09091	129,39872	129,45666	33,8527	39,5781	39,6406	1,49	11,13	18,60
50-20-9	7	110,3838	101,6055	7200,00	126,60279	123,67380	123,97348	24,6023	21,7196	22,0146	1,55	11,43	18,96
ORT	7	104,5851	97,2610	7200,00	129,2011	130,1162	129,0980	33,2219	34,2249	33,1938	1,51	11,35	18,63
100-40-1	7	218,9882	199,0609	7200,00	270,19107	266,32721	266,78898	35,7329	33,7918	34,0238	4,68	21,52	31,23
100-40-2	7	204,5902	179,0293	7200,00	256,12019	256,00364	253,37318	43,0605	42,9954	41,5261	4,67	21,78	31,26
100-40-3	8	193,8331	176,9375	7200,00	257,05526	258,03626	258,82889	45,2803	45,8347	46,2827	4,64	21,86	31,71
100-40-5	8	197,9578	181,6226	7200,00	241,22952	237,81538	239,40548	32,8191	30,9393	31,8148	4,74	21,81	31,68
100-40-6	7	244,5303	214,2248	7200,00	315,59930	306,27059	305,80184	47,3215	42,9669	42,7481	4,68	22,28	31,06
100-40-7	4	193,3276	173,6691	7200,00	228,21395	229,22913	228,43297	31,4074	31,9919	31,5335	4,67	22,09	31,24
100-40-8	6	177,5625	163,3084	7200,00	257,17449	258,45034	254,43920	57,4778	58,2591	55,8029	4,82	21,92	31,59
100-40-10	10	203,8949	182,1065	7200,00	284,13615	273,59228	277,17597	56,0274	50,2375	52,2054	4,63	21,48	31,15
ORT	7	204,3356	183,7449	7200,00	263,7150	260,7156	260,5308	43,6409	42,1271	41,9922	4,69	21,84	31,37

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Ok, Yeşim
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : Erzurum / 1981
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0(312) 582 3813
 e-mail : yesimok@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	2010
Lisans	Sakarya Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	2003
Lise	Erzurum Anadolu Lisesi	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005 - 2007	Atatürk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2007 - Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Ok, Y., Atak, M., Akcayol, M. A. (2011), Yalın Sinirsel Bulanık Bir Model İle İMKB 100 Endeksi Tahmini, *Journal Of The Faculty Of Engineering & Architecture of Gazi University*, 26(4).

Ok, Y., Atak, M., (2014, 14-16 Ekim), *Network Design for Multiple Energy Generation Facilities*, IMSS'14 and CIE'44 Sempozyumunda sunuldu. İstanbul.

Hobiler

El sanatları ve ebru, doğa yürüyüşü,



GAZİ GELECEKTİR..