
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TEHLİKELİ ATIK YÖNETİMİ MODELİ

Durdu Hakan UTKU

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2016

Durdu Hakan UTKU tarafından hazırlanan "TEHLİKELİ ATIK YÖNETİMİ MODELİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Serpil EROL

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……..……..

Başkan : Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……..……

Üye : Prof. Dr. Oya Ekin KARAŞAN

Endüstri Mühendisliği, Bilkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……...

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bahar ÖZYÖRÜK

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Üye : Yrd. Doç. Dr. Alper ŞEKER

Endüstri Mühendisliği, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Tez Savunma Tarihi: 08/12/2016

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 çalışmasında;

- 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 çalışmasında 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.

Durdu Hakan UTKU

08/12/2016

TEHLİKELİ ATIK YÖNETİM MODELİ

(Doktora Tezi)

Durdu Hakan UTKU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2016

ÖZET

Tehlikeli atık yönetimi, endüstriyel ve evsel atıkların toplanması, taşınması, işlenmesi, geri kazanımı ve bertaraf edilmesini içeren işlemleri kapsamaktadır. Bu tez çalışmasında, tehlikeli atık yönetimi problemi için tek amaçlı tehlikeli atık tesis yerleşim ve rotalama modeli geliştirilmiştir. Amaç, en düşük maliyet ve en yüksek kazançla, belirlenmiş aday yerleşim yerlerine atık işleme, geri dönüşüm ve bertaraf etme tesislerinin yerleştirilmesi ve söz konusu atıkların atık üretim merkezleri ve bu tesisler arasında taşınmasının sağlanmasıdır. Literatürde farklı çalışmalarda yer alan, atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinin yerleşimi; bu tesisler arasında, atık, geri kazanım maddeleri ve atık kalıntılarının taşınması; maliyet-kazanç/geri kazanım, risk, kapasite, teknoloji uyumu ve atık-atık uyumu, geliştirilen tehlikeli atık modelinde tek bir model içinde yer almaktadır. Tehlikeli atık yönetim modelinin doğruluğu değişik büyüklükteki test problemleri ile denendikten sonra, ülkemizde uygulanan Atık Yönetimi Yönetmeliği doğrultusunda modifiye edilerek, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığından elde edilen gerçek veriler ile Marmara Bölgesi uygulaması ve bu uygulamanın değişik senaryolarla duyarlılık analizi yapılmıştır. Geliştirilen model, yönetmeliklerdeki değişikliklere uygun olarak genişletilebilecek yapıdadır.

Bilim Kodu : 90615
Anahtar Kelimeler : Tehlikeli atık, Tesis yerleşimi ve rotalama, Lojistik
Sayfa Adedi : 103
Danışman : Prof. Dr. Serpil EROL

HAZARDOUS WASTE MANAGEMENT MODEL

(Ph. D. Thesis)

Durdu Hakan UTKU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2016

ABSTRACT

Hazardous waste management includes the collection, transportation, treatment, recycling and disposal of industrial and municipal hazardous wastes. In this thesis study, a single objective hazardous waste location and routing model has been developed for the hazardous waste management problem. The objective is to locate the waste treatment, recycling and disposal facilities to the predetermined candidate location sites and transport these wastes and waste residues with minimum cost and maximum profit. The location of waste treatment, recycling and disposal facilities; the transportation of wastes and waste residues between these facilities; cost, profit and recycling benefits; transportation and facility risks, capacity, equity and technology compatibility are included in one model different from the studies in the literature including only some of these ones. After the validation of the hazardous management model tested with different sized test problems, the model is modified according to the Hazardous Waste Regulation which is prepared by the Ministry of Environment and Urban Ministry of Turkish Republic and applied to Marmara Region by using the data obtained from the Ministry of Environment and Urban Ministry of Turkish Republic. After the application, a sensitivity analysis is made with different scenarios. The developed model can be modified according to the changes in the regulations in time.

Science Code : 90615
Key Words : Hazardous waste, Location and routing, Logistics
Page Number : 103
Supervisor : Prof. Dr. Serpil EROL

TEŞEKKÜR

Başta her koşulda bana destek, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Serpil EROL, ilk danışmanım ve tez izleme komitesi üyesi Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK ve tez izleme komitesi üyesi Yrd. Doç. Dr. Alper ŞEKER olmak üzere; doktora öğrenimim boyunca, bilgi ve tecrübelerini aktaran çok kıymetli endüstri mühendisliği bölümü öğretim üyeleri; güler yüzlerini, desteklerini cömertçe sunan araştırma görevlileri ve bölüm idari personeline çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmasının Marmara bölgesi uygulaması ile ilgili tehlikeli atık verilerinin temininde sağladıkları destek ve sıcak ilgileri için T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı İzin ve Lisans Dairesi Başkanı Ufuk TÜRKMEN'e, Veri Değerlendirme Şube Müdürü Arzu NURAY'a; coğrafi verilerin sağlanmasında özverili destekleri için İşlem GIS firmasının yöneticisi Dr. Halil SÖĞÜT'e ve Şehir Plancısı Fatma Gülhun DURAN'a teşekkür ederim.

Her zaman candan desteklerini hissettiğim, çok sevdiğim annem, babam, eşim ve oğluma sevgi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 7

2.1. Tehlikeli Madde Lojistiği Modellerinde Kullanılan Ölçütler 7

2.1.1. Risk 7

2.1.2. Denge 11

2.1.3. Maliyet 13

2.2. Tehlikeli Atık Tesis Yerleşim ve Rotalama Problemi ile İlgili Literatür Araştırması 14

3. TEHLİKELİ ATIK YÖNETİMİ MODELİ 23

3.1. Model 23

3.2. Deneysel Çalışma 34

3.2.1. Test problemleri için geliştirilen veri üretim mekanizması 34

3.2.2. Örnek problem 40

3.2.3. Test problemleri ve sonuçlarının değerlendirilmesi 46

4. TEHLİKELİ ATIK YÖNETİMİ MODELİNİN MARMARA BÖLGESİNE UYGULANMASI 49

4.1. Model 49

Sayfa

4.2. Veriler 61

4.3. Uygulama Sonuçları 72

4. SONUÇ VE ÖNERİLER 81

KAYNAKLAR 83

EKLER 89

EK-1. Örnek problem için GAMS/CPLEX kodu 90

EK-2. Örnek problemin GAMS/CPLEX çözümü 91

EK-3. 10 düğümden oluşan test probleminin GAMS/CPLEX kodu 92

EK-4. 10 düğümden oluşan test probleminin GAMS/CPLEX çözümü 93

EK-5. Marmara Bölgesi 2014 yılı tehlikeli atık üretim miktarı 94

EK-6. Tehlikeli atık işleme, geri kazanım ve bertaraf yöntemleri 95

EK-7. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca lisans verilen Marmara Bölgesinde mevcut kurulu tehlikeli atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesisleri 97

EK-8. Tesis istenmeyen etkisinden etkilenen nüfus 98

EK-9. Tesis yerleşim yerleri arasındaki mesafeler 99

EK-10. Marmara Bölgesinde tehlikeli atık yönetiminin uygulamasına ait GAMS/CPLEX kodu 101

EK-11. Marmara Bölgesinde tehlikeli atık yönetiminin uygulamasına ait GAMS/CPLEX çözümü 102

ÖZGEÇMİŞ 103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan alternatif ulaştırma riski modelleri 9

Çizelge 2.2. Literatürde yapılan çalışmalar ve önerilen tehlikeli atık yönetimi modelinin karşılaştırması 20

Çizelge 3.1. Tesislerin test problemleri için kabul edilen kapasite, maliyet, istenmeyen etki ve kazanç seviyeleri ve rassal hesaplamalarında kullanılan oranlar 36

Çizelge 3.2. Yerleşim yerleri arasında bulunan mesafeler 42

Çizelge 3.3. Yerleşim yerlerinde üretilen atık miktarları 42

Çizelge 3.4. Tehlikeli atık geri kazanım ve atık kalıntısı oranları 43

Çizelge 3.5. Test problemlerinin çözüm sonuçları 48

Çizelge 4.1. Atık kodu bazında en yüksek beyan gerçekleştirilen ilk 10 atık 62

Çizelge 4.2. Mevcut tesisler 64

Çizelge 4.3. Aday tesis yerleri 65

Çizelge 4.4. Tehlikeli atık üretim merkezlerinden geri kazanıma giden atık oranları 67

Çizelge 4.5. Tehlikeli atık üretim merkezlerinden bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı oranları 68

Çizelge 4.6. Tehlikeli atık üretim merkezlerinden geri kazanım tesislerine giden geri kazanım maddesi oranları 69

Çizelge 4.7. Tehlikeli atık geri kazanım tesislerinden bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı oranları 69

Çizelge 4.8. Tehlikeli atık işleme tesisleri teknolojilerinin atık tipleri ile uyumluluğu .. 70

Çizelge 4.9. Tehlikeli atık geri kazanım tesisleri teknolojilerinin atık tipleri ile uyumluluğu..... 70

Çizelge 4.10. Tehlikeli atık bertaraf etme tesisleri teknolojilerinin atık tipleri ile uyumluluğu..... 71

Çizelge 4.11. Çözüm sonucunda yeni açılan tesisler..... 75

Çizelge 4.12. Denge ve ulaştırma istenmeyen etki kısıtları ile senaryolar ve sonuçları..... 77

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.13. Tesis sayısı üst sınırı, atık miktarı alt sınırı, denge ve ulaştırma istenmeyen etkisi kısıtları ile senaryolar ve sonuçları..... 78

Çizelge 5.1. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı verilerine göre Marmara Bölgesinin il bazında 2014 yılı tehlikeli atık üretim miktarı..... 94

Çizelge 7.1. Marmara Bölgesinde mevcut kurulu tehlikeli atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesisleri..... 97

Çizelge 8.1. Tesis istenmeyen etkisinden etkilenen nüfus..... 98

Çizelge 9.1. Tesis yerleşim yerleri arasındaki mesafeler..... 99

Çizelge 9.2. Tesis yerleşim yerleri arasındaki kuş uçumu mesafeler..... 100

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Tehlikeli atık yönetimi modeli akışı 24

Şekil 3.2. Yerleşim yerleri, yol ağı ve mesafeler 41

Şekil 3.3. Atık üretim merkezlerinden atık işleme tesislerine atık akışı 44

Şekil 3.4. Geri kazanım maddelerinin atık üretim merkezleri ve atık işleme tesislerinden geri kazanım tesislerine akışı 44

Şekil 3.5. Bertaraf etme tesislerine atık kalıntısı akışı 45

Şekil 3.6. Atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinde işlem gören tehlikeli atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı miktarları 46

Şekil 4.1. Marmara Bölgesi tehlikeli atık yönetimi modeli akışı 50

Şekil 4.2. Marmara Bölgesi tehlikeli atık yönetimi modeli uygulama probleminde, atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı akışı 50

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
Ghz	Giga Hertz
kg	Kilogram
km	Kilometre
m	Metre

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
A	Atık Tipi
AAU	Atık-Atık Uyumluluğu
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AF	Amaç Fonksiyonu
AFD	Amaç Fonksiyonu Değeri
AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
AİT	Atık İşleme Tesisi
AMTS	Açılmasına İzin Verilen Maksimum Tesis Sayısı
ATS	Yeni Açılan Tesis Sayısı
AÜT	Atık Üretim Tesisi
BET	Bertaraf Etme Tesisi
Ç	Çok
D	Denge
DA	Denge Alt Sınır Değişimi
E	Evet
EDAM	Tesis Açılması için En Düşük Atık Miktarı
GKT	Geri Kazanım Tesisi
H	Hayır
K	Kazanç

Simgeler	Açıklamalar
M	Maliyet
MTS	Mevcut Tesis Sayısı
R	Risk
SN	Senaryo Numarası
T	Tek
T.C.	Türkiye Cumhuriyeti
TU	Teknoloji Uyumluluğu
UM	Ulaştırma Modu
TABS	Tehlikeli Atık Beyan Sistemi
TTS	Toplam Tesis Sayısı
UİE	Ulaştırma İstenmeyen Etkisi Alt Sınır Değişimi
Z	Zaman

1. GİRİŞ

Hayatımızı kolaylaştıran endüstriyel ve teknolojik gelişmelerle birlikte, kullanılan hammadde ve üretim yöntemleriyle çok sayıda tehlikeli madde üretilmektedir. Gelişmiş ülkelerde, çok büyük miktarda tehlikeli madde, tüketim amaçlı ve endüstriyel faaliyetlerin bir yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. En çok bilinen tehlikeli madde/atık ilişkili tesislere örnek olarak, petrol rafinerileri, kimyasal işlemler yapan fabrikalar, kâğıt fabrikaları ve nükleer güç tesisleri verilebilir [1, 2].

Amerika Birleşik Devletleri Ulaştırma Departmanı'na göre, insanlara, malzemelere ve çevreye zarar verme özelliği olan cisim veya maddeye tehlikeli madde denilmektedir. Birleşmiş Milletler, fiziksel, kimyasal ve nükleer özelliklerine göre bu maddeleri dokuz kategoriye ayırmaktadır: patlayıcılar ve piroteknikler; gazlar; yanıcı ve tutuşabilir sıvılar; yanıcı, tutuşabilir ve ıslak olduğunda tehlikeli katılar; oksidize ediciler ve organik peroksitler; zehirli ve enfekte edici maddeler; radyoaktif maddeler; asidik veya bazik aşındırıcı maddeler ve tehlikeli atıklar gibi çeşitli tehlikeli maddeler [3].

Atık, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca, Atık Yönetimi Yönetmeliğinde, "üreticisi veya fiilen elinde bulunduran gerçek veya tüzel kişi tarafından çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan herhangi bir madde veya materyali"; tehlikeli atık ise aynı yönetmeliğin "EK-3/A'sında yer alan tehlikeli özelliklerden birini ya da birden fazlasını taşıyan atıkları" ifade etmektedir [4]. Tehlikeli atık olmanın dört temel özelliği, tutuşabilir, reaksiyona girebilir, aşındırabilir ve toksik olmasıdır [5].

Eurostat, tehlikeli atıkları, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından belirlenen atıkları "Listelenmiş Atıklar"; bu liste içinde yer almayan, ancak, yanıcı, aşındırıcı, reaktif veya toksik atıkları "Karakteristik Atıklar"; bataryalar, böcek ilaçları, termostat gibi civa içeren ekipmanlar ve lambalar gibi atıkları "Üniversal Atıklar" ve hem radyoaktif hem de tehlikeli atık bileşenleri içeren atıkları "Karışık Atıklar" olmak üzere dört sınıfa ayırmaktadır [6]. Boffey ve diğerleri, "Tehlikeli Madde", "İstenmeyen Madde", "Tehlikeli Atık" gibi değişik adlarla ifade edilen bu kavramları "yüksek", "orta" ve "düşük" seviye atıklar olarak ifade etmektedir. Nükleer veya yüksek derecede zehirli kimyasal atık gibi yüksek seviye atıklar, taşınması esnasında oluşacak bir kazayla ciddi problemlere neden olabilmekte ve uzun yıllar bu etkiler hissedilebilmektedir. Ev atıkları ve

toksik olmayan endüstriyel atıklar gibi düşük seviyeli atıklar, tehlikeli olmaktan çok kötü koku yayan, böceklerin çoğalmasına, dolayısıyla hastalıkların yayılmasına neden olan atıklardır. Orta seviyeli atıklar ise yüksek ve düşük seviye dışında kalan atıklardan oluşmaktadır [7].

Eurostat istatistiklerine göre, 2014 yılı itibarıyla, 28 Avrupa Birliği ülkesi yaklaşık 2 milyar 598 milyon ton atık üretmiş; bu atıkların: %33,5'i inşaat, %29,8'i maden ve taş ocağı, %9,8'i üretim, %8,1'i evsel, %3,7'si enerji, %15'i ise %8,8'i atık su ve %3,8'i hizmetlerle ilgili olmak üzere diğer ekonomik faaliyetler kaynaklıdır. Bu atıkların %3,7'sini oluşturan 95,6 milyon ton atık tehlikeli atık olarak sınıflandırılmıştır. Toplam atıkların 2 milyar 145 milyon tonu işlem görmüş; bunların, %39'u geri kazanım, %10,8'i inşaat ve çevre düzenleme amaçlı dolgulama, %6,5'u enerji kazanımını da içeren yakma, %43,6'sı ise yakma dışındaki bertaraf etme işlemlerine tabi tutulmuştur [6].

Atık yönetimi, atığın oluşumunun önlenmesi, kaynağında azaltılması, yeniden kullanılması, özelliğine ve türüne göre ayrılması, biriktirilmesi, toplanması, geçici depolanması, taşınması, ara depolanması, geri dönüşümü, enerji geri kazanımı dâhil geri kazanılması, bertarafı, bertaraf işlemleri sonrası izlenmesi, kontrolü ve denetimi faaliyetlerini kapsamaktadır [4].

Çevresel konulara duyarlılık son yıllarda gerek toplumsal gerekse hükümetlerin kararları ve uygulamaları bakımından artmaktadır. Bu duyarlılık, nükleer, kimyasal, ev atıkları v.b. değişik formlarda olan atıkların kendine has özellikleri dikkate alınarak uygun şekilde bertarafını içermektedir. Tehlikeli atıkların bertaraf edilmesi aşamasından önce, metallerin ve metal bileşiklerinin ıslahı/geri dönüşümü, atılan nihai bileşiklerin veya karışımların oluşmasına neden olan fiziksel-kimyasal işlemler (örneğin, buharlaştırma, kurutma, kalsinasyon v.b.) gibi atık işleme teknolojileri kullanılabilmektedir. Atık işlemenin amacı, atığın kimyasal ve/veya fiziksel özelliklerinin emniyetli bir şekilde bertaraf edilebilmesi için değiştirilmesidir [4]. Atık işleme ve arıtma teknolojileri, atığı daha az zararlı hale getirmekte, hareketsizleştirmekte veya miktarını azaltmaktadır [8]. Atık işleme teknolojilerinin atık tipi ile uyumlu olması gerekmektedir [5,9]. Bununla birlikte, bazı atık tipleri aynı teknoloji ile işlenebilmesine rağmen birlikte işlem görmesi mümkün değildir [9]. Bu durumda atık-atık uyumluluğunun dikkate alınmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Tehlikeli atıkların bertaraf edilmesinde, yüksek sıcaklıkta yakma, toprak üstü ve altı depolama ve güneş enerjisi ile detoksifikasyon gibi teknoloji ve yöntemler kullanılmaktadır. Yakma en az atık kalıntısı bırakan yöntemdir. Bunun yanında yakma yönteminde hava kirletme standartlarının altında bir kirletme sağlayacak teknoloji kullanılmalıdır. Toprak üstü ve altı depolama yönteminde ise önemli olan yeraltı sularının etkilenmesini önleyecek tedbirlerin alınmasıdır. Atık kalıntılarının bertaraf edilmesi tehlikeli atık yönetiminde son aşamadır. Atık kalıntılarının bertaraf edilmesi için arazi doldurma, derin kuyu enjeksiyonu ve denize dökme yöntemleri kullanılabilmektedir. Arazi doldurma en çok kullanılan yöntemdir [2, 4].

Geri dönüşüm, "enerji geri kazanımı ve yakıt olarak kullanımı ya da dolgu yapmak üzere atıkların tekrar işlenmesi hariç olmak üzere, organik maddelerin tekrar işlenmesi dâhil atıkların tekrar işlenerek asıl kullanım amacı ya da diğer amaçlar doğrultusunda ürünlere, malzemelere ya da maddelere dönüştürüldüğü herhangi bir geri kazanım işlemini"; geri kazanım ise, "piyasada ya da bir tesiste kullanılan maddelerin yerine ikame edilmek üzere atıkların faydalı bir amaç için kullanıma hazır hale getirilmesini" ifade etmektedir [4]. Atıkların bertarafı esnasında kullanılan yakma yöntemi ile birlikte enerji kazanımı; ayrıştırılan geri dönüştürülebilir maddelerden ise kazanç elde edilmesi mümkündür [10, 11].

Tehlikeli madde/atık işleyen, üreten tesislerin yerleşimi ile ilgili dikkate alınması gereken iki önemli konu bulunmaktadır: birincisi, bu tesislerde bir kaza olması olasılığı nedeniyle alınan risk; ikincisi ise, bu tesislerin bir nüfus yerleşim yerine yakın kurulmuş olması nedeniyle ortaya çıkan toplumda oluşması muhtemel rahatsızlığı ifade eden istenmeyen etkidir. Risk, bir kaza olması olasılığıyla ilgili iken; istenmeyen etki, bir nüfus yerleşim yerine yakın kurulmuş kimyasal endüstriyel tesisin günlük toksik emisyonu nedeniyle topluma verilen rahatsızlıkla ilgili olmaktadır [12].

Endüstriyel toplumlarda, tehlikeli madde/atıkların kolay yayılabilir olmaları sebebiyle, tehlikeli madde taşımacılığı da önemli bir problem olarak yer almaktadır. Bununla birlikte, tehlikeli maddelerin çoğu üretildiği yerde kullanılmamakta ve farklı yerlere taşınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır [1, 2]. Tehlikeli madde/atık taşımacılığının diğer maddelerin taşımacılığından farkı, tehlikeli madde/atıkların taşınması esnasında bir kaza ile serbest kalmaları sonucunda çevreye olan etkileridir. Zehirli kimyasal içeriklerinden dolayı,

tehlikeli madde/atıklar, bitkiler, hayvanlar ve insanların ölümüne veya yaralanmasına neden olabildiğinden, çevreye ve insan sağlığına çok zararlı sonuçlar doğurabilmektedir. Bu risk, toplum tarafından bilinmekte ve birçok durumda söz konusu bu faaliyetler belirli kurallar dâhilinde yürütülmektedir. Bunun bir sonucu olarak, tehlikeli madde/atık taşıyan araçlar diğer araçlara oranla daha iyi kaza siciline sahiptir. Nadir olarak meydana gelse de tehlikeli maddelerin taşınması esnasında kazalar olabilmektedir. Örneğin, 1979'da Amerika Birleşik Devletleri, Ontario Mississauga'da, toksik kimyasallar taşıyan bir tren raydan çıkmış ve hasarlı tanktan sızan klorin 200 000 kişinin tahliyesine neden olmuştur. 1982'de Afganistan'da bir tünelde bir akaryakıt kamyonunun infilak etmesi sonucu 2700 kişinin öldüğü rapor edilmiştir [13].

1926–1997 yılları arasında meydana gelen tehlikeli kimyasallarla ilgili kazalara yönelik yapılan bir araştırmada, kazaların %54'ünün sabit tesislerde, %41'inin ulaştırma esnasında ve %5'inin de bilinmeyen şekilde oluştuğu tespit edilmiştir [14].

Oggero ve diğerleri tarafından 1932 - Haziran 2004 yılları arasında, karayollarında ve demiryollarında meydana gelen tehlikeli madde/atık kazalarına ilişkin yaptıkları bir çalışmada, meydana gelen kazaların %68'inin karayollarında meydana geldiği; meydana gelen kazaların %28'inde yangın oluştuğu; %14'ünde patlamalar olduğu ve %6'sında ise gaz bulutları meydana geldiği belirtilmiştir. Bu kazaların %67'sinde herhangi bir ölüm olup olmadığına ilişkin bir husus rapor edilmemiş; rapor edilenlerin %33'ünün %61'nde ise ölüm meydana gelmemiştir [15]. Benzer şekilde, Yang ve diğerleri tarafından Çin'de 2000-2008 yılları arasında meydana gelen tehlikeli madde/atık kazaları hakkında yapılan bir araştırmada 332 kaza meydana geldiği belirlenmiştir. Araştırmada, 2000-2007 yılları arasında kaza sıklıklarında artış, 2008 yılında ise bir azalma olduğu belirtilmektedir. Bu araştırmada tehlikeli madde yayılması oranı (%84,5), bunu gaz bulutu ile takip eden kaza oranı (%13), yangının takip ettiği kaza oranı (%10,2), alınan tedbirlerle hiçbir yayılmanın olmadığı kaza oranı (%9,9) ve patlama gerçekleşen kaza oranı ise (%5,9)'dur [16].

Tez çalışmasında, tehlikeli atık tesis yerleşimi ve rotalama problemi ele alınmaktadır. Bu çalışmada, tehlikeli atık üretim merkezlerinde oluşan tehlikeli atıkların en az maliyet ve en yüksek kazanç ile tehlikeli atıkların işlenmesi, geri kazanımı ve bertaraf edilmesi amacıyla atık arzını karşılayacak tesislerin yerleştirilmesi ve bu atıkların söz konusu tesisler arasında taşınmasını sağlayacak; tesis istenmeyen etkisi, ulaştırma istenmeyen etkisi ve dengeyi

dikkate alan literatürde bulunan modellerden daha gelişmiş bir tehlikeli atık yönetim modelinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Tezin ikinci bölümünde, konu ile ilgili literatür araştırması, yapılan çalışmanın önemi ve farklılıkları; üçüncü bölümünde tehlikeli atık yönetim modeli ve üretilmiş test problemleri ile elde edilen çözümlerin değerlendirilmesi; dördüncü bölümde Türkiye'nin Marmara bölgesinde tehlikeli atık yönetim modelinin gerçek verilerle bir uygulaması ve değerlendirmeler; beşinci bölümde ise sonuç ve öneriler yer almaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tehlikeli madde lojistiği alanı, tehlikeli atık/maddelerin depolanması, taşınması ile bu esnada oluşan riskin belirlenmesi; atık işleme tesisleri, geri kazanım tesisleri ve atık bertaraf etme tesisleri gibi tesislerin tesis yerleşim yerlerinin seçimi ve tesis yerleşim riskinin ortaya koyulması; bir politik karar sonucu oluşan etkilerin toplumun bütün üyelerine adaletli bir şekilde dağıtılmasını içeren denge kavramı konularını içermektedir. Tez çalışmasının konusu olan tehlikeli atık yönetim modeli, tesis yerleşimi ve rotalama problemidir. Bu nedenle literatür araştırması bölümünde öncelikle temel ölçütler ile tehlikeli atık tesis yerleşimi ve rotalama konusunu içeren birleşik modeller açıklanmakta; sonrasında, tehlikeli atık tesis yerleşim ve rotalama problemi ile ilgili literatür incelemesi sunulmaktadır.

2.1. Tehlikeli Madde Lojistiği Modellerinde Kullanılan Ölçütler

Tehlikeli maddelerin stratejik yönetiminde dikkate alınan ölçütler; bu maddeler ile ilgili riskler, risklerin dengeli dağıtımı ve yönetim sürecinde katlanılması gereken maliyetlerdir. Amaç, maliyet ve riskin en azlanması ve riskin bölgelere en dengeli dağıtımının yapılmasıdır.

2.1.1. Risk

Risk, tehlikeli madde/atıkların kullanımı, depolanması, taşınması ve yok edilmesi sırasında tehlikeli maddelerin serbest kalması ile ortaya çıkabilen olası istenmeyen sonuçların bir ölçüsüdür. Tehlikeli madde/atıkların serbest kalması, dağılma, yangın veya yanıcı sıvılarla bir patlamaya veya basınçla sıvılaştırılmış gazlarda toksik bulut gibi değişik olaylara neden olabilmektedir. Bu olayların istenmeyen sonuçları; ölümler, incinmeler, malzemelerin değerlerinde kayıplar ve çevre tahriplerini içermektedir. Tehlikeli madde serbest kalma olayı, bir nükleer reaktörün çekirdeğinin erimesi veya tehlikeli madde taşıyan bir trenin raydan çıkması gibi nedenlerle olabilmektedir. Bu iki kategorideki riskleri birbirinden ayırt etmek bakımından, birinci örnekteki kaza riski, diğeri ise maruz kalma riski olarak sınıflandırılmaktadır. Bunların yanı sıra, tehlikeli maddelerin serbest kalması, bir tehlikeli madde taşıyıcısındaki sızıntılar veya bir tehlikeli madde atık yakıcısından yayılan toksik

maddeler sebebiyle kaza olmadan da söz konusu olabilmektedir [19]. Tehlikeli madde/atıklarla ilgili tesisler ve bu tesislere taşınan maddelerle ilgili risk, tehlikeli maddelerle ilgili tesis tasarımında ve tehlikeli madde taşımacılığı için güzergâh belirlenmesinde, alternatif kararların risklerinin karşılaştırılması önemlidir. Bu karşılaştırma, değişik taşıma, depolama ve bertaraf yöntemleri ile ilişkili risklerin niceliklendirilmesini gerektirmektedir. Boffey ve diğerleri, az tehlikeli veya düşük seviye atık/tehlikeli madde olarak sınıflandırılabilecek maddeleri içeren tesislerin yerleşimi veya bu maddelerin taşınmasını gerektiren durumlarda yerleşim yerlerine olan mesafelerin belirli bir mesafeden kısa olmaması gibi bazı kısıtlamaların ve yönetimlerin belirlediği bazı çevre koruyucu etkilerin dikkate alındığını ifade etmektedir [7].

Tehlikeli madde taşımacılığı kapsamında risk, içinde tehlikeli madde olan istenilmeyen potansiyel olaylar nedeniyle, bu olaylara maruz kalan aktörün zarar görme olasılık ve şiddetinin bir ölçüsüdür [3]. Tehlikeli madde taşımacılığında istenilmeyen bir olay, tehlikeli bir maddenin serbest kalması ile ortaya çıkan kazadır [13]. Bir potansiyel tehlikeli faaliyetle ilişkili en yaygın sosyal risk ölçütü, onun istenilmeyen sonucunun tahmin edilmesidir. Bir faaliyet esnasında bir olayın gerçekleşme olasılığının bu olayın sonucuyla çarpılması risk olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım, belirlenen iki nokta arasında tehlikeli bir maddenin bir kez taşınması gibi sadece bir olay için uygundur. Çoklu taşımada veya bir tehlikeli madde tesisinde bir işlemde, beklenen bütün muhtemel olayların toplam sonuçlarının hesaplanması gerekmektedir. Böylece, bir risk değerlendirmesi çalışmasının ana bileşenleri; olasılıkların tahmini, her bir olayın sonuçlarının tahmini, faaliyet hacminin tahminidir. Bir olayın olasılığı, her bir taşıma için birim mesafede, birim zaman periyodunda veya birim miktar için tahmin edilmelidir. Faaliyet hacmi, taşımaların sayısı, toplam kat edilen mesafe, tehlikeli madde tesisinin toplam işletilme zamanı veya işlem gören tehlikeli atıkların miktarı ile temsil edilebilmektedir [19].

Risk değerlendirmesi nitel veya nicel olabilmektedir. Nitel risk değerlendirmesi, olası kaza senaryolarının tanımlanması ile ilgilenmekte ve istenilmeyen sonuçlarının tahmin etmeye çalışmaktadır. Genellikle güvenilir veri eksikliği durumunda kaza olasılıklarının ve sonuçlarının tahmin edilmesine ihtiyaç olduğunda kullanılmaktadır.

Nicel risk değerlendirmesi ise üç aşamadan oluşmaktadır: tehlike ve tehlikeye maruz kalan reseptörün tanımlanması; sıklık analizi; modelleme ve riskin hesaplanması [3].

$\{1,2,...,n\}$ sıralı yol kümesini içeren bir yolda, $p_i : i$ hattı üzerinde bir serbest kalma kazası olasılığı, $c_i :$ i hattında serbest kalma kazasının sonucunun bir ölçüsü ve P_R kaza nedenli tehlikeli madde yayılımı olma olasılığı olmak üzere, Çizelge 2.1'de literatürde kullanılan bazı ulaştırma riski modelleri özetlenmektedir [3].

Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan alternatif ulaştırma riski modelleri [3]

Model	Formülasyon
Geleneksel Risk [17, 18, 19, 20]	$\sum_{i=1}^{n} p_i c_i$
Nüfus etkisi [17, 21]	$\sum_{i=1}^{n} c_i$
Olay olasılığı [22]	$\sum_{i=1}^{n} p_i$
Alınan risk [23]	$\sum_{i=1}^{n} p_i c_i^{\alpha}$
Koşullu olasılık [24, 25, 26]	$\sum_{i=1}^{n} p_i c_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} p_i$
Maksimum nüfus etkisi [27]	$\max_{e_i \in P} c_i$
Beklenen istenmeyen etki [27]	$\sum_{i=1}^{n} p_i(\exp(\alpha c_i)-1), \alpha > 0$
Ortalama-Varyans[27, 28]	$\sum_{i=1}^{n} (p_i c \ + \beta p_i c_i^2)4, \beta > 0$
Talep tatmini [29]	$\sum_{i=1}^{n}(1-\exp(-p_i)c_i)\prod_{j=1}^{n}\exp(p_j)$
Beklenen kaza istenmeyen etkisi [30]	$\sum_{i=1}^{n} P_R p_i c_i$

Risk, literatürde çok farklı yöntemlerle modellenmiştir. Revelle ve diğerleri riski modellemek için riske maruz kalan nüfus etkisini kullanmıştır, böylece toplumsal tepkinin de azaltılması amaçlanmaktadır [23]. Gionnakis tarafından geliştirilen, tehlikeli atık işleme ve bertaraf etme tesislerinin yerleştirilmesi ve atık üretim merkezlerinden bu tesislere

atıkların taşınmasını ele alan çok amaçlı matematiksel modelde risk, taşınan toplam atık miktarı olarak ifade edilmiştir [31]. Kara ve diğerleri, tehlikeli madde ulaştırma problemlerinde en kısa yol modelinde oluşan hataların giderilmesi amacıyla iki yöntem önermiştir [32]. Çalışmada, önerilen direnç ayarlayıcı en kısa yol algoritması (impedance adjusting shortest path algorithm) bilinen tehlikeli madde rota seçim metodlarında yer alan yol dirençlerinin ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Alumur ve Kara, tehlikeli atık tesis yerleşim modelinde; Samanlıoğlu ise endüstriyel atık tesis yerleşimi ve rotalama probleminde ulaştırma riskini, taşınan tehlikeli atık miktarı ve yol güzergâhı boyunca yolun belirli bir mesafe yanlarında taşınan atıktan etkilenmesi olası nüfusun bir fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir [5, 33]. Glickman ve diğerleri, demiryolu ile tehlikeli madde taşımacılığına yönelik alternatif yol belirlenmesinde, kaza risklerinin de dikkate alındığı bir model geliştirmişlerdir [34]. Bu amaçla, demiryolu taşıma riskini sayısallaştıran bir model oluşturmuşlar; daha sonra, maliyet ve riskin ağırlıklı bir birleşimi kullanarak alternatif güzergâhlar belirlemişlerdir.

Liu ve diğerleri, demiryolu taşımacılığında, demiryolunun kırılmasının engellenmesi ve tank güvenliği tasarım iyileştirmesinden oluşan iki tip risk azaltma stratejisini içeren bir eniyileme modeli geliştirmişlerdir [35]. Modelde, belirli bir yatırım seviyesinde riskin düşürülmesinin en büyüklenmesi için pareto eniyileme tekniği kullanılmış; demiryolu aracının kaza nedenine özgü demiryolundan çıkma olasılığını analiz etmek için bir negatif binom regresyon modeli önerilmiştir.

Saat ve diğerleri, Kuzey Amerika'da çoğunlukla demiryolu ile taşınan bir grup hafif kimyasalın, sayısal ve çevresel risk analizinin yapıldığı bir çalışma yapmışlardır [30]. Çalışmada, Kuzey Amerika demiryolu boyunca farklı kimyasal yayılmaya maruz kalma senaryoları esas alınarak rassal tahminler geliştiren bir coğrafi bilgi sistemi ile ilişkilendirilen tehlikeli maddelerin taşınmasının çevresel sonucu modeli kullanılmıştır. Risk analizi için, her ürünün ülke boyunca oluşturduğu yıllık taşıma riskinin tahmin edilmesinde tehlikeli maddelerin taşınmasının çevresel sonucu modeli kullanılarak tahmin edilen temizleme maliyetini, rotaya özel toprak tipi ve yeraltı suyuna olan derinlikle ilişkili olasılık dağılımlarını ve kimyasal tank araçlarının güvenlik özellikleri ilişkilendirilmiştir.

Bu tez ile geliştirilen tehlikeli atık yönetimi modelinde, işlenen veya taşınan atık miktarının oluşturacağı risk/istenmeyen etki, tesislerin ve yol güzergâhının 1 000 m dış sınırı içinde kalan nüfusun etkileneceği dikkate alınarak modellenmektedir. Böylece, toplumsal tepkinin de azaltılması amaçlanmaktadır.

Risk modelleme yaklaşımı bakımından, Revelle ve diğerleri; Cappanera, Alumur ve Kara, Samanlıoğlu ile benzer modelleme yaklaşımı benimsemişlerdir [5, 23, 33]. Revelle ve diğerleri, Alumur ve Kara, Samanlıoğlu'ndan farklı olarak Cappanera'nın risk modelleme yaklaşımında olduğu gibi tesis ve ulaştırma risklerini kısıtlar içinde ve belirli eşik değerlerden faydalanarak modellemişlerdir [21, 5, 33]. Eşik değerlerini kullanarak en iyi değerle birlikte toplumsal faydanın da gerçekleşmesinin ön planda tutulmasını amaçladıklarını belirtmektedirler.

2.1.2. Denge

Denge, bir politik karar sonucu oluşan etkilerin toplumun bütün üyelerine adaletli bir şekilde dağıtılmasını ifade etmektedir. Potansiyel tehlikeli bir faaliyet ile ilişkili toplumsal risklerin değerlendirilmesinde denge konusunun ele alınması gerekmektedir. Toplumun küçük bir bölümüne tehlikeli maddelerle ilgili riskleri yüklerken, büyük bir kısmının bu maddelerin kullanıldığı faaliyetlerden faydalanması denge prensibiyle çelişmektedir. Dengenin dikkate alınmadığı uygulamalarda potansiyel tehlikeli tesislerin yerleşimine toplumun karşı çıktığı görülmektedir [36].

Tehlikeli atık endüstrisini işleten işletmeler çoğunlukla maliyetin azaltılmasıyla ilgilenen organizasyonlardır. Kârlı olabilmek ve diğer işletmelerle rekabet edebilmek için maliyetlerin azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle, istenmeyen etkilerin en azlanması maliyetin en azlanmasından sonra gelen bir amaç olmaktadır. İşletmelerin karlılığını toplumsal çıkarların önünde tutma eğilimi, toplumsal çıkarların devletin koyacağı kanunlarla düzenlenmesi ve korunmasını bir gereklilik olarak ortaya çıkarmaktadır [5].

Erkut, tesis yerleşim kararlarında dengenin bulunmamasını sayısallaştırmak için, bir hizmet tesisi ve tesisin kullanıcıları arasındaki mesafe üzerine yaptığı bir çalışmada, değişim katsayısı ve ekonomide kullanılan Gini katsayısını önermiştir [37]. Mandell, toplumsal hizmet dağıtım problemlerinin analitik modelleri için Gini katsayısının

kullanımını öneren ilk araştırmacıdır [38]. Bu iki ölçü, tehlikeli tesislerin kullanıcılarından uzak yerleşim yerlerine kurulmasını desteklemektedir. Romero ve diğerleri, geliştirdikleri tehlikeli madde tesis yerleşim ve rotalama probleminde, dengeyi Gini katsayısını kullanarak modellemişlerdir [39].

Tehlikeli madde lojistiği için matematiksel programlama modeline dengeyi dâhil etmenin diğer bir yolu, sistemde bireysel istenmeyen etkiler için üst sınır kullanmaktır. Zografos ve Davis, tehlikeli madde ulaşım modellerinde ulaştırma ağındaki akış miktarı ile ilgili kısıt kullanmışlardır [40]. List ve Mirchandani ile Erkut ve Neuman çok ölçütlü modellerde dengenin alternatif bir ifadesi olarak, herhangi bir birey için en büyük istenmeyen etkinin en azlanması şeklinde kullanmışlardır [41, 42]. Dengenin sağlanması için Gopalan ve diğerleri, tek bir yol yerine mevcut başlangıç-bitiş çifti arasındaki tehlikeli madde ulaşımı için çoklu rotaların kullanımını önermişlerdir [43]. Current ve Ratick, geliştirdikleri çok amaçlı modelde, dengeyi ulaştırma riskinin bireye etkisinin ve tesis riskinin bireye etkisinin en azlanması olarak modele yansıtmışlardır [44].

Potansiyel tehlikeli faaliyetlerin birden fazla yerleşim yeri ve rotalara dağıtımı stratejisi dengeyi sağlamaya olanak sağlasa da, toplam toplumsal riski artırabilmektedir. Tehlikeli tesislerin dengeli dağıtımı ile ulaştırma maliyetlerinde azalma olmasına rağmen küçük tesislerdeki inşaat ve işletim maliyetlerinde artış olabilmektedir. Bu nedenle denge, toplam risk ve sistem maliyeti ile birlikte düşünülmeli ve çok amaçlı modeller; toplam risk, denge ve tehlikeli madde yönetim sistemlerindeki toplam maliyet arasındaki ilişkilerin analizinde kullanılmalıdır [36].

Giannikos, dengeyi tehlikeli atık işleyen tesislerin toplam kapasiteleri ile doğru orantılı, tesisin yerleşim yerlerine olan mesafesi ile ters orantılı olduğu bir fonksiyon ile ifade etmiştir. Modelde, tesislerin denge değerlerinin maksimum denge değerinden küçük olması sağlanmaya çalışılmıştır [31].

Kang ve diğerleri, çalışmalarında, gerçek hayata daha uygun olan çoklu tehlikeli madde tipi, çoklu seyahat tipi içeren bir problemde, tehlikeli maddelerin taşınmasında uygun rotaların belirlenmesinde belirli bir güvenirlik seviyesinde "riske maruz değer" ile belirli bir güvenirlik seviyesinde "iki varış noktası arasındaki seyahat sayısı"ndan oluşan riski en küçüklemişlerdir [45]. Aynı modelde, risk değerlerinin belirli bir eşik değerden küçük

olması sağlanarak denge modele dâhil edilmiştir. Güvenilirlik seviyesi içeren "riske maruz değer yaklaşımı" risk ve denge tanımlamasına yeni bir bakış açısı getirmektedir. Bu yaklaşımdan hareketle, Garrido ve Bronfman, alternatif yolların kaza olasılıkları ve muhtemel kaza sonuçlarının belirlenen eşik değerlerden daha küçük olmasını sağlayan ve riski en küçükleyen bir model önermişlerdir. Bu modelde denge, kısıtlarda kullanılan eşik değerler ile sağlanmaktadır [46].

Tez ile geliştirilen tehlikeli atık yönetimi modelinde, denge, Giannikos'un denge yaklaşımına benzer bir formülasyon ile modele yansıtılmaktadır [31]. İlk modelde, Giannikos'un denge yaklaşımında olduğu gibi tesis kapasiteleri ile doğru orantılı, tesislerin yerleşim yerlerine olan kuş uçumu mesafeleri ile ters orantılı bir formülasyon benimsenirken; Marmara bölgesinde yapılan uygulamanın yer aldığı ikinci modelde, Giannikos'tan farklı olarak tesislerin kapasiteleri yerine, tesislerde işlenen atık miktarı ve tesis istenmeyen etkisinden etkilen nüfus ile doğru orantılı ve tesislerin yerleşim yerlerine olan kuş uçumu mesafeleri ile ters orantılı bir formülasyon kullanılmaktadır. Her iki formülasyonda da eşik değerler belirlenmekte ve elde edilen denge değerlerinin bu değerlerden daha küçük olması beklenmektedir.

2.1.3. Maliyet

Toplumsal açıdan, tehlikeli madde lojistik kararlarının ana ilgi alanı, olası istenmeyen sonuçların incelenmesidir. Ancak, tehlikeli maddelerle uğraşan iş çevreleri için lojistik kararların ekonomik sonuçları daha önemli olmaktadır. Risk ve denge toplumsal ilgi alanlarıdır. Endüstriyel kuruluşların, ekonomik olarak kayda değer faydalar elde etmeden denge ile ilgili hususları kanuni düzenlemeler olmadan lojistik kararlarına dâhil etmelerini beklemek gerçeği yansıtmamaktadır. Tehlikeli madde lojistik kararlarıyla ilişkili maliyetlerin tahmini, endüstriyel kuruluşlar için büyük önem taşımaktadır. Tehlikeli maddelerle ilgili maliyet bağlantılı politik kararların değerlendirmelerinde maliyetlerin de dikkate alınması; tehlikeli maddelerin taşınması için belirlenmiş rotalar ve tehlikeli atıkların arıtılması için tanımlanmış teknolojilerin ekonomik olarak uygulanabilir olması gerekmektedir [36].

2.2. Tehlikeli Atık Tesis Yerleşimi ve Rotalama Problemi ile İlgili Literatür Araştırması

Tehlikeli atıklarla ilgili tesislerinin yerleşimi ve tehlikeli atıkların taşınması kararları, tehlikeli atık yönetim sistemi içinde birbirleri ile ilişkili kararlardır. Bir potansiyel tehlikeli atık tesisinin yerleşim yeri, tehlikeli madde taşımacılığının ya başlangıç noktasını ya da varış noktasını oluşturmakta, bu nedenle rotalama kararlarını etkilemektedir. Tehlikeli madde yönetim sisteminin toplam riski, tesis ve taşıma risklerinden oluşmaktadır [36]. Tehlikeli madde tesislerinin yerleştirilmesi ve tehlikeli madde taşıma rotaları için ilk birleşik yaklaşımlardan biri Zografos ve Samara tarafından sunulmuştur [48]. Zografos ve Samara, tesis ve taşıma risklerini içeren birleşik yerleştirme ve rota problemi için amaç programlama modeli önermişlerdir [48]. Çalışmada dikkate alınan ölçütler, tehlikeli atık bertaraf etme tesisleri ve yerleşim merkezleri arasındaki toplam mesafe, toplam taşıma riski ve toplam taşıma süresidir.

Revelle ve diğerleri, depolama tesislerinin yerleşimini, bu tesislere nükleer reaktör atamasını ve nükleer atıkların taşınması için rotaların belirlenmesini aynı anda gerçekleştiren bir model önermişlerdir [21]. Bu modelde, her bir nükleer reaktör ve depolama tesisi arasındaki taşıma rotası, toplam taşıma maliyetini ve riskini en küçükleyecek şekilde belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu iki amacın ağırlıklı toplamı olarak ele alınmıştır.

List ve Mirchandani, çok atık tipli tehlikeli atık taşıma ve tehlikeli atık arıtma tesisi yerleşimi ile ilgili karar vermede kullanılabilecek bir model önermişlerdir [49]. Model, risk, maliyet ve dengeli risk dağılımını içeren, çok amaçlı bir birleşik model olarak sunulmuştur. Ağırlıklı toplama yaklaşımını kullanarak toplam maliyet, toplam risk ve dengeyi ifade eden maksimum riski en küçükleyerek etkin sonuç elde etmişlerdir.

Stowers ve Palekar, riski en küçükleyerek tesis yerleşim ve rotalama kararlarının verilmesini sağlayan tek atık için tek amaçlı bir model geliştirmişlerdir [50]. Modelde, nüfus yoğunluğu esas alınarak risk değerlendirmesi yapılmıştır.

Tehlikeli maddelerin doğası gereği, kaza sonrasında yayılan tehlikeli maddelerin toplanması ve temizlenmesi için uzman acil müdahale timlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tehlikeli maddelerin serbest kalmasının olumsuz etkilerinin azaltılmasında uzman timlerin müdahale zamanı çok önemli olup ve baz istasyon ile kazanın gerçekleştiği yer arasındaki mesafenin bir fonksiyonudur. Bir bölgede ihtiyaç duyulan acil müdahale istasyonlarının sayısının belirlenmesi tehlikeli madde yönetim sisteminin tasarımı ile ilişkili olarak bir stratejik karardır. List, acil müdahale timlerinin yerleştirilmesinde, tepki zamanı, risk, risk dengesi ve maliyeti dikkate alan çok amaçlı bir model sunmuştur [51]. Mirchandani ve diğerleri, tehlikeli madde taşımacılığında denetleme istasyonları oluşturulması problemleri ile ilgili yaptıkları çalışmada, tehlikeli madde taşımacılığı için konulmuş kuralların uygulanmasını sağlamak için ulaştırma ağı içerisinde tehlikeli madde taşıyıcılarını denetleyecek birimlerinin yerleşimini ele almışlardır [52].

Current ve Ratick, List ve Mirchandani'nin çalışmasına benzer içerikli; sabit ve değişken maliyetler; ulaştırma ve tesis yerleşim riski; dengeyi içeren çok amaçlı tesis yerleşim ve rotalama modeli önermişlerdir [44, 49]. Farklı olarak, rota ve tesisler için ayrı olmak üzere iki denge ele alınmaktadır.

List ve Turnquist, geliştirdiği rotalama ve acil müdahale ekibi yerleşim kararlarını birbirleri ile koordineli tanımlayan matematiksel programlama modelinde, coğrafi bilgi sisteminden yararlanarak çözümlerin daha gerçekçi olmasını sağladıklarını belirtmişlerdir [53].

Wyman ve Kuby, solar detoksifikasyon atık işleme teknolojisi ile yakma teknolojisininin kıyaslandığı, maliyet, risk ve denge krtiterlerini içeren çok amaçlı bir model önermişlerdir [54].

Alidi, kimyasal ve petrokimya endüstrisi tarafından üretilen tehlikeli atıkların uygun yönetimine yardımcı olmak amacıyla, hedef programlama yaklaşımını kullanarak çok amaçlı bir eniyileme modeli geliştirmiştir [10]. Çalışmada, hedeflerin önceliklerinin belirlenmesi için Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yaklaşımı kullanılmış olup toplam sekiz amaç belirlenmiştir. Modelde farklı tip tehlikeli atıklar belirli atık üretim yerlerinde stokastik olarak üretilmekte olduğu; üretilen atıklar atık arıtma tesislerinde işlenerek geri dönüştürülebilir maddeler tekrar sisteme kazandırıldığı; ayrıştırılan atıkların zararsız olanlarının kalıcı depolara konulduğu, diğer atıkların ise yakıldığı varsayılmıştır.

Helander ve Melachrinoudis, tehlikeli madde ulaştırma kazalarının beklenen sayısını en azlamak için birleşik yerleşim ve rotalama problemini geliştirmişlerdir [55]. Çalışmalarında, problem, güvenilir 1- medyan problemi olarak formüle edilmiştir. Güvenilirlik kavramının bir seyahatin kaza yapmadan tamamlanması olarak tanımlandığı çalışmada, verilen bir planlama periyodu için yol güvenilirlik ölçütleri beklenen kaza sayısının elde edilmesinde kullanılmıştır.

Nema ve Modak, atık arıtma tesisleri için optimum atık dağıtım ve ulaştırma rotalarının elde edilmesi için yaptıkları çalışmada, bölgesel tehlikeli madde yönetim sisteminin tasarım ve modellemesinde kullanılan tasarım kriterleri ile ilgili kısıtlamaları incelemişler ve stratejik bir tasarım sunmuşlardır [8]. Önerilen tasarım, birikimli tehlikeli madde oluşumu ve yıllık atık oluşum oranlarının adaptif kullanımına dayanmaktadır. Çalışmanın amacı, optimum atık bertaraf etme ve iyileştirme tesislerinin yerlerini belirlemek ve bu tesisler için yıllık atık oluşum oranı ile bağlantılı optimal atık dağıtım ve ulaştırma rotalarını elde etmektir.

Giannikos'un, bertaraf etme ve arıtma tesislerinin yerleştirilmesi ve ulaştırma ağı boyunca tehlikeli atıkların ulaştırması için geliştirdiği çok amaçlı modelde, toplam işletme maliyeti ve toplam riskin en küçüklenmesi; yerleşim merkezleri boyunca riskin dengeli dağıtılması ve arıtma tesislerinin işlemesi nedeniyle oluşan bireysel istenmeyen etkinin dengeli dağıtılması amaçlanmıştır [31].

Nema ve Gupta, tehlikeli atık arıtma ve bertaraf etme tesis yerlerinin seçimi, tehlikeli atık üreten tesislerden tehlikeli atık arıtma ve bertaraf etme tesislerine aktarılması ve ulaştırma rotalarının seçilmesini içeren çok amaçlı tamsayılı programlamaya dayalı bir model önermişlerdir [9].

Nema ve Gupta, farklı bir çalışmalarında, tehlikeli atık arıtma ve bertaraf etme tesis yerlerinin seçimi, tehlikeli atık üreten tesislerden tehlikeli atık arıtma ve bertaraf etme tesislerine aktarılması ve ulaştırma rotalarının seçilmesini içeren çok amaçlı tamsayılı hedef programlamaya dayalı bir model önermişlerdir [56].

Cappanera ve diğerleri, tehlikeli tesis yerleşim ve rotalama problemi için Lagrangian gevşetmeye dayalı bir sezgisel yaklaşımı önermişlerdir [57]. Geliştirdikleri tehlikeli tesis

yerleşim ve rotalama modelinde, tek atık tipini dikkate almışlar; tesis ve rota risklerini kısıtlarda eşik değerlerle kısıtlayarak modellemişlerdir. Cappanera ve arkadaşları, en küçük toplam maliyetle en iyi sonucu elde edebilmek amacıyla Lagrangian gevşetimi ve dal sınır yaklaşımlarından faydalanmışlardır [57].

Alumur ve Kara, atık üretim merkezlerinde üretilen atıkların işlenmesi için gerekli değişik teknolojilere sahip atık işleme tesislerinin ve atık bertaraf etme tesislerinin nerelerde kurulması ve taşınacak olan tehlikeli atıkların hangi rotalarla uygun teknolojiye sahip tesislere taşınması gerektiğinin belirlendiği bir model geliştirmişlerdir [5]. Modelde, taşınan atık miktarı ile bu atıklardan etkilenecek nüfusun dikkate alındığı riskin, yerleşim ve taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesinde bir uygulama yapılmıştır.

Emek ve Kara, atık bertaraf etme yöntemi, bertaraf etme tesislerinin yerleşim yerleri ve atık akış yapısının belirlendiği birleşik bir tehlikeli atık yönetim modeli oluşturmuşlardır [2]. Çalışmada, bertaraf etme yöntemlerinden yakma teknolojisi ve bu teknolojinin hava kirliliği standartlarını karşılaması incelenmiş; bu amaçla, modelde, kirlilik üreten tesislerin kirlilik düzeyleri için Gaussian Plume denklemi kullanılmıştır. Modelin Türkiye'de geniş çaplı bir uygulaması yapılmış ve uygulama sonuçları değerlendirilmiştir.

Boffey ve diğerleri, ev atıkları ve zehirli olmayan endüstriyel atıklardan oluşan düşük seviye atıkların bertaraf etme tesislerinin yerleşimi için çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir [7]. Modelde, taşıma maliyeti, tesis yerleşim maliyeti, atıkların taşındığı rotalar boyunca bulunan yerleşim yerlerine olan istenmeyen etki ve dengenin en küçüklenmesi amaçlanmış; problemin çözümü için en kısa yol rotalama yönteminin kullanıldığı bir sezgisel algoritma önerilmiştir.

Erkut ve diğerleri, Yunanistan'ın Merkezi Makedonya bölgesinde, bölgesel olarak katı atık yönetimine ilişkin, çok ölçütlü karışık tamsayılı programlama tesis yerleştirme modeli geliştirmişlerdir [11]. Model ile aktarma istasyonları, malzeme geri kazanım tesisleri, yakma tesisleri ve toprağa dolgulama yerlerinin tespit edilmesi ile birlikte bu tesisler arasında işleyen atık akışının da yönetilmesi amaçlanmıştır. Modellenen sistem, toplama, taşıma, işleme ve bertaraf etmeyi kapsamaktadır. Sera gazı etkisinin, toprağa dolgulanacak atık kalıntısı miktarının ve maliyetin en küçüklenmesi; enerji kazanımının ve geri kazanım

tesislerinde malzeme kazanımının en büyüklenmesi amaçlanan modelde, problemin çözümünde leksikografik minimaks yaklaşımı kullanılmıştır.

Samanlıoğlu, farklı teknolojiler kullanan tehlikeli atık işleme tesislerinin yerleşim yerinin belirlenmesi, farklı endüstriyel tehlikeli atıkların teknolojisine uyumlu atık işleme tesisine rotalanması; geri dönüşüm tesislerinin yerleşim yerinin belirlenmesi ve geri dönüştürülecek atık ve kalıntıların bu tesislere rotalanması; bertaraf etme tesislerinin yerlerinin belirlenmesi ve atık kalıntılarının bertaraf etme tesislerine rotalanmasını esas alan bir model önermiştir [33]. Modelde, yerleştirilen tesislerin sabit maliyeti ile atık ve atık kalıntılarının rotalama maliyetlerinin, atık ve atık kalıntılarının ulaştırma risklerinin ve yerleştirilen tesislerin çevrede yerleşik nüfusa risklerinin en küçüklenmesi olmak üzere üç amaç fonksiyonu alınmıştır. Bir coğrafi bilgi sistemi kullanılarak Marmara bölgesine yönelik elde edilen veriler doğrultusunda oluşturulan problem, Lexicographic Ağırlıklandırılmış Tchebycheff formülasyonu çözülerek sonuçları değerlendirilmiştir.

Jiang ve diğerleri, tehlikeli madde tesis yerleşim ve farklı taşıma tipleriyle rotalamayı esas alan bir model geliştirmişlerdir [58]. Model, Kuzeydoğu Çin'de basitleştirilmiş çoklu taşıma tipi içeren bir ulaştırma ağı üzerinde örnek bir problemle uygulanmıştır. Tehlikeli maddelerin farklı taşıma tiplerinde kullanılabilen konteyner ve tanklarla taşındığı varsayılmıştır. Aktarma alanlarında en iyi yerleşim yerinin belirlenmesi ve belirlenen yerler arasında en uygun taşıma modları ve rotaların belirlenmesini içeren modelde, toplam taşıma maliyetinin ve tehlikeli madde taşınması nedeniyle oluşacak toplumsal riskin en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Meiyi ve diğerleri, taşıma risklerinin zamana dayalı bulanık rassal değişkenlerden oluştuğu, tehlikeli madde taşımacılığı tesis çizelgeleme problemi üzerine bir model geliştirmişlerdir [59]. Tesis yerleşim çizelgeleme problemi, depoların yerleşim yerlerini belirleyen tesis yerleşim problemi ve araçların kullanımını çizelgeleyen araç çizelgeleme probleminin bir birleşiminden oluşmuştur. Çalışmada, her depo-müşteri çifti için hareket başlangıcı ve seyir zamanının en iyilenmesi için bir çizelgeleme en iyileme modeli ve bir bulanık rassal benzetim tabanlı genetik algoritma oluşturulmuştur. Sonrasında, rota üzerinde oluşan riskin ve yerleşim yeri riskinin en küçüklenmesi için beklenen değer modeli ortaya konulmuş ve bir modifiye edilmiş parçacık sürü en iyileme algoritması geliştirilmiştir.

Zhao ve Verter, toplam maliyet ve riski en küçükleyerek, kullanılmış petrol ürünleri depoları, arıtma tesisleri ve bertaraf etme tesislerinin tesis yerleşim yerleri ve en uygun taşıma rotalarının belirlenmesi amacıyla iki amaçlı bir model geliştirmişlerdir [60]. İki amaçlı tesis yerleşim ve rotalama probleminin çözümü için modifiye edilmiş ağırlıklandırılmış amaç programlama kullanılmıştır. Kullanılan yöntem, iki amaçlı en iyileme problemini geleneksel karışık tamsayılı doğrusal programlamaya dönüştüren yüzde normalize tekniğinin uyarlanmasıyla elde edilmiştir. Güneybatı Çin'de bulunan Chongqing'e ait veriler kullanılarak önerilen modele uygun örnek problem çözülmüştür. Çalışmada, çevreye saçılan kullanılmış petrolün yanması sonucu oluşacak hava kirliliğini dikkate alan yeni bir risk ölçütü kullanılmıştır.

Zhao ve diğerleri, toplam maliyet ve toplam riski en küçüklemeyi amaçlayan, farklı tehlikeli atık tesislerinin yerleşimi ve atık/atık kalıntılarının bu tesislere ulaştırma rotalarının belirlenmesine olanak sağlayan çok amaçlı karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir [61]. Etkin sonuç elde edebilmek amacıyla, ağırlıklı toplama, genişletilmiş ağırlıklı Tchebycheff yaklaşımı ve genişletilmiş ε-kısıt yaklaşımları kullanılmıştır. Çalışmada, üretilmiş ve gerçek verilerle uygulama yapılmış, sonuçları incelenmiştir.

Yılmaz ve diğerleri, toplam maliyet ve riskin en küçüklendiği, çok amaçlı tehlikeli atık tesis yerleşim ve rotalama probleminde çevresel etkilerin ele alındığı bir model geliştirmişlerdir [62]. Model, tesis yerleşim yerlerini, tesislerin kapasitelerini ve ulaştırma rotalarını belirleyebilen çok amaçlı karışık tamsayılı tesis yerleşim ve rotalama modelidir. Çalışmada, modelin Türkiye genelinde bir uygulaması yapılmıştır.

Çizelge 2.2'de literatürde yapılan çalışmalar ve bu tez ile önerilen model arasındaki farklılıklar belirtilmektedir.

Çizelge 2.2. Literatürde yapılan çalışmalar ve önerilen tehlikeli atık yönetimi modelinin karşılaştırması

Yazar	AF	M	D	R	Z	K	A	TU	AAU	UM	Tur	AİT	GKT	BET
Zografos ve Samara [48]	Ç	E	H	E	E	H	T	H	H	T	H	H	H	E
Stowers ve Palekar [50]	T	H	H	E	H	H	T	H	H	T	H	H	H	E
List ve Mirchandani [49]	Ç	E	E	E	H	H	Ç	H	H	T	H	E	H	H
Current ve Ratick [44]	T	H	E	E	H	H	Ç	H	H	T	H	H	H	E
Wyman ve Kuby [54]	Ç	E	E	E	H	H	T	E	H	T	H	E	H	H
Alidi [10]	Ç	H	H	E	H	E	T	H	H	T	H	H	H	H
Giannikos [31]	Ç	E	E	E	H	H	T	H	H	T	H	E	H	H
Nema ve Modak [8]	Ç	E	H	E	H	H	Ç	H	H	T	H	E	H	E
Nema ve Gupta [9]	Ç	E	H	E	H	H	Ç	E	E	T	H	E	H	E
Nema ve Gupta [56]	Ç	E	E	E	H	H	Ç	E	E	T	H	E	H	E
Cappanera ve diğerleri [1]	T	E	H	E	H	H	T	H	H	T	H	E	H	H
Alumur ve Kara [5]	Ç	E	H	E	H	H	Ç	E	H	T	H	E	H	E
Erkut ve diğerleri [11]	Ç	E	H	H	H	E	Ç	H	H	T	H	E	E	E
Boffey ve diğerleri [7]	Ç	E	H	E	H	H	T	H	H	T	H	H	H	E
Samanlıoğlu [33]	Ç	E	H	E	H	H	Ç	E	H	T	H	E	E	E
Jiang ve diğerleri [58]	Ç	E	H	E	H	H	Ç	H	H	Ç	H	H	H	H
Zhao ve Verter [49]	Ç	E	H	E	H	H	Ç	H	H	T	E	E	H	E
Zhao ve diğerleri [61]	Ç	E	H	E	H	H	Ç	E	H	T	H	E	E	E
Yılmaz ve diğerleri [62]	Ç	E	E	E	H	H	Ç	H	H	T	H	E	E	E
ÖNERİLEN MODEL	T	E	E	E	H	E	Ç	E	E	T	H	E	E	E

AF:Amaç Fonksiyonu; M: Maliyet; D: Denge; R:Risk; Z: Zaman; K: Kazanç; A: Atık Tipi; TU: Teknoloji Uyumluluğu; AAU: Atık-Atık Uyumluluğu; UM: Ulaştırma Modu; AİT: Atık İşleme Tesisi; GKT: Geri Kazanım Tesisi; BET: Bertaraf Etme Tesisi; Ç: Çok; T: Tek; E: Evet; H: Hayır

Bu tez çalışması ile önerilen tehlikeli atık yönetim modeli, çok sayıda atık tipini esas alan tek amaçlı bir modeldir. İncelenen modellerin çoğunda amaç fonksiyonu içinde yer alan risk ve denge, tehlikeli atık yönetim modelinde kısıtlar içinde yer almaktadır. Burada, kanuni zorunluluklar, toplumsal ve çevresel yükümlülüklerin bazen en iyi değerden farklı olabileceği; bu durumun eşik değerlerle modele yansıtılarak giderilebileceği düşüncesiyle hareket edilmektedir.

Cappanera ve diğerleri benzer yöntemle tesis ve ulaştırma risklerini eşik değerlerle kısıtlarda kullanmışlardır [1].

Maliyet ölçütü literatürde yer alan modellerin büyük çoğunluğunda yer almasına rağmen, geri kazanım ve enerji kazancı, sadece Alidi, Erkut ve diğerleri tarafından modele dâhil edilmiştir [10, 11]. Önerilen tehlikeli atık yönetim modelinde her iki kazanç amaç fonksiyonunda bulunmaktadır.

Toplumsal adaleti temsil eden denge, literatürde yer alan her çalışmalarda farklı yöntemlerle modellere yansıtılmıştır. Önerilen modelde, denge, Giannikos'un denge formülasyonunun geliştirilmesiyle elde edilmiştir [31].

Risk, tehlikeli atık tesis yerleşim ve rotalama problemlerinin en temel ölçütlerinden biridir. Bu nedenle, bir çalışma dışında literatürde yer alan, incelenen diğer çalışmaların tamamında yer almaktadır. Ancak, her çalışmada Çizelge 2.1'de yer alan modelleme yaklaşımlarından veya benzerlerinden faydalanılarak farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Önerilen modelde, Alumur ve Kara ile Samanlıoğlu'nun da kullandığı "nüfus etkisi" yaklaşımından faydalanılmıştır [5, 33]. Bu çalışmalardan farklı olarak, bu tez ile önerilen tehlikeli atık yönetim modelinde kısıtlarda yer verilerek risk modellenmektedir.

Teknoloji uyumluluğu, literatürdeki modellerde sadece atık işleme tesislerinde göz önünde bulundurulmaktadır. Ancak gerçek uygulamada, geri kazanım ve bertaraf etme tesisleri için de atık tipinin, kullanılan yöntem ve teknoloji ile uyumluluğu gerekmektedir. Önerilen tehlikeli atık yönetim modeli üç tesis tipi için de teknoloji uyumluluğunu içermektedir. Bununla birlikte, tez ile önerilen model, Nema ve Gupta'nın çalışmalarında kullandığı atık-atık uyumluluğunu da içermektedir [56].

Tehlikeli atık yönetim modeli atık işleme tesisi, geri kazanım tesisi ve bertaraf etme tesislerini içermektedir. Literatürde, geri kazanım tesislerini model içine alan çalışma sayısı dört adettir (Çizelge 2.2). Tehlikeli atık yönetim modeli, atık üretim merkezlerinden bertaraf etme tesislerine atık kalıntısı akışını içermektedir. Literatürdeki çalışmalar içinde atık üretim merkezlerinden bertaraf etme tesislerine atık kalıntısı akışı olan ise sadece Zhao ve diğerleri ile Yılmaz ve diğerleri olmak üzere iki adettir [61, 62].

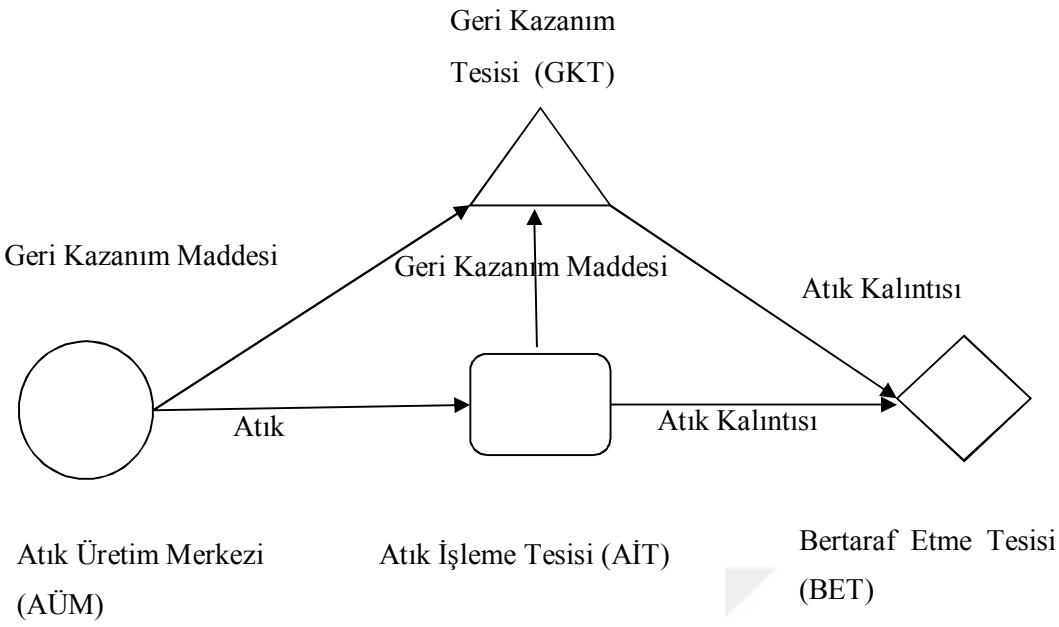
Yapılan literatür incelemesi sonucunda, tezde önerilen tehlikeli atık yönetim modeli, literatürdeki modellerden farklı olarak, risk, maliyet, geri kazanım ve enerji kazancı, denge, bütün tesisler için teknoloji uyumluluğu, atık-atık uyumu gibi bir çok ölçüt ve özelliği aynı anda içermesi bakımından katkı sağlamaktadır. Ayrıntılı açıklamalar sonraki bölümlerde yer almaktadır.

3. TEHLİKELİ ATIK YÖNETİMİ MODELİ

Tehlikeli atık yönetimi, endüstriyel ve evsel atıkların toplanması, taşınması, işlenmesi, geri kazanımı ve bertaraf edilmesini içeren işlemlerin, bir düzen içerisinde yerine getirilmesini kapsamaktadır. Bu bölümde, "Tehlikeli atık yönetimi problemi" için geliştirilen tek amaçlı tehlikeli atık tesis yerleşim ve rotalama modeli sunulmaktadır. Amaç, en düşük maliyet ve en yüksek kazançla, belirlenmiş aday yerleşim yerlerine atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinin yerleştirilmesi ve söz konusu atıkların atık üretim merkezleri ve bu tesisler arasında en uygun rotalarla taşınmasının sağlanmasıdır. Tehlikeli atık yönetimi problemi için, Çizelge 2.2'de kapsamı gösterilen, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak; atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinin yerleşimi ve atık üretim merkezlerinde üretilen atıkların bu tesislere taşınmasını; risk, maliyet, geri kazanım kazancı, enerji kazanımı, denge, atık-teknoloji uyumu, atık-atık uyumunun tamamını aynı anda içeren tek amaçlı bir tamsayılı programlama modeli geliştirilmektedir. Geliştirilen model, bir örnek uygulamayla gösterilmekte; yeterli sayıda test problemleriyle modelin doğrulaması yapılmaktadır.

3.1. Model

Modelde, tehlikeli atık üretim merkezleri, tutuşabilir, reaksiyona girebilir, aşındırabilir ve toksik her türlü sanayi atığı üreten tesis, enerji üretim tesisleri veya evsel atık üreten yerleşim yerleri olabilmektedir. Tehlikeli atık üretim merkezlerinde üretilen atıkların geri kazanılabilir olanları geri kazanım tesislerine, diğerleri ise işlenmek üzere tehlikeli atık işleme tesislerine gönderilmektedir. Tehlikeli atık işleme tesislerinde, atık tipine uygun atık işleme teknolojisi ile atık-atık uyumu gözetilerek işlem gören atıklardan geri kazanılabilir olanlar geri kazanım tesislerine, diğerleri ise yakma ve hacim küçültme işlemi sonrasında atık kalıntısı olarak bertaraf etme tesislerine gönderilmektedir. Yakma esnasında elde edilen enerji kazanımı maliyet düşürücü bir gelir olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde, atık geri kazanım tesislerinde geri kazanılan maddelerden kazanç elde edilmekte; atık kalıntıları ise bertaraf etme tesislerinde bertaraf edilmektedir. Sistemin işleyişi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Tehlikeli atık yönetimi modeli akışı

Model, tek amaçlı olarak oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu, atık işleme, bertaraf etme ve geri kazanım tesisleri sabit maliyetleri ile atıkların tesisler arasında taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesini; geri kazanımla elde edilen kazancın ve atık işleme tesislerinde elde edilen enerji kazanım değerinin en büyüklenmesini içermektedir. Genellikle amaçlar içerisinde ele alınan ulaştırma riskleri ve sabit tesis riskleri bu çalışmada kısıtlar olarak modele dâhil edilmektedir. Modelde, tesis istenmeyen etkisinin hesaplanmasında belirli mesafede yer alan nüfus; taşıma istenmeyen etkisinin hesaplanmasında ise belirli mesafede yer alan nüfus ve taşınan tehlikeli atık miktarı dikkate alınmaktadır. Taşıma istenmeyen etkisi ile tesis istenmeyen etkileri için eşik değerler belirlenmektedir.

Potansiyel tehlikeli bir faaliyet ile ilişkili toplumsal risklerin değerlendirilmesinde denge konusunun ele alınması, bu faaliyetlere ilişkin alınacak kararların toplum tarafından da kabul görmesine olanak sağlamaktadır [36]. Bu nedenle, alınan kararlar sonucunda riskin toplumun bütün kesimlerine dengeli dağıtımını ifade eden denge, tez ile geliştirilen modele, Giannikos'un tesisin kapasitesi ile artan, yerleşim yerlerine uzaklığı ile azalan bir fonksiyon olarak ifade edilen bireysel istenmeyen etkinin her tesis tipi için uyarlanarak kısıtlara ilave edilmesi suretiyle yansıtılmakta olup her tesis tipi için bireysel istenmeyen etkilere yönelik eşik değerler belirlenmektedir.

Modelde, tehlikeli atıkların taşındığı ulaştırma ağı $N = \{V, A\}$ ile tanımlanmaktadır. Bu ağın düğümleri, yerleşim merkezleri, atık işleme tesisleri, atık yok etme tesisleri ve geri dönüşüm tesisleri için aday yerleşim alanlarıdır.

Varsayımlar

Atık üretim merkezlerinde farklı türde atık üretilmektedir.

Hâlihazırda mevcut kurulu atık işleme, bertaraf etme ve geri kazanım tesisleri bulunmaktadır. İhtiyaca göre, önceden belirlenmiş aday yerleşim yerlerine yeni tesisler kurulabilmektedir.

Atık işleme tesisleri için farklı teknolojilerin seçimi söz konusudur.

Atık işleme tesislerinde, atık-atık uyumu dikkate alınarak atıklar işleme tabi tutulmaktadır. Geri kazanım tesisleri her atık tipini işleyebilme özelliğindedir.

Tehlikeli atıkların, atık artıklarının ve geri kazanım maddelerinin birim taşıma maliyeti bilinmektedir.

Atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinin birim değişken maliyeti bilinmektedir.

Atık işleme tesislerinden enerji kazanımı; geri kazanım tesislerinden ise tehlikeli atık geri kazanımı nedeniyle kazanç elde edilmektedir. Bu tesislerden elde edilen birim kazanç bilinmektedir.

Tüm tehlikeli atık tipleri tek tip araç ve aynı maliyet ile taşınmaktadır.

Taşıma maliyeti, taşıma uzaklığına ve taşınan maddenin miktarına bağlıdır.

Geri kazanım maddeleri, tehlikeli atık üretim merkezlerinden ya da atık işleme tesislerinden elde edilebilmektedir.

Tehlikeli atık üretim merkezindeki geri kazanım oranı bilinmektedir ve atık tipine bağlıdır.

Atık işleme tesislerindeki geri kazanım oranı bilinmektedir ve atık tipine bağlıdır.

Geri kazanım tesislerindeki geri kazanılan madde ve bertaraf etme tesislerine gönderilen kalıntı oranları bilinmektedir.

Matematiksel modelde kullanılan, indisler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıda verilmektedir.

Kümeler

N = (V, A) ulaştırma şebekesi,
G, atık üretim merkezleri, $G \subset V$
T, aday atık işleme tesis yerleri, $T \subset V$
TA , mevcut aday atık işleme tesisleri, $TA \subset T$,
D, aday bertaraf etme tesis yerleri, $D \subset V$
DA , mevcut aday atık işleme tesisleri, $DA \subset D$,
R, aday geri kazanım tesis yerleri, $R \subset V$
RA , mevcut aday atık işleme tesisleri, $RA \subset R$,
$K = \{k_1,...,k\}$, atık işleme teknolojileri,
$Z = \{a_1,...,a\}$,tehlikeli atık tipleri,
$S = \{s_1,...,s\}$, tehlikeli atık uyumu birinci küme $S \subset Z$,
$H = \{s_2,...,h\}$, tehlikeli atık uyumu ikinci küme $H \subset Z$ ve $H \neq Z$,
L, nüfus yerleşim yerleri, $L \subseteq V$.

Parametreler

ca_{ij} $(i, j) \in A$, $i \in G, j \in T$ hattında bir birim tehlikeli atığı taşıma maliyeti,

cb_{ij} $(i, j) \in A$, $i \in G, j \in R$ hattında bir birim geri kazanım maddesi taşıma maliyeti,

cd_{ij} $(i, j) \in A$, $i \in T, j \in D$ hattında bir birim tehlikeli atık kalıntısını taşıma maliyeti,

cr_{ij} $(i,j) \in A$, $i \in T, j \in R$ hattında bir birim geri kazanım maddesini taşıma maliyeti,

cs_{ij} $(i,j) \in A$, $i \in R, j \in D$ hattında bir birim atık kalıntısı taşıma maliyeti,

vct_{ki} $i \in T$ düğümünde $k \in K$ atık işleme teknolojisine sahip atık işleme tesisinin değişken maliyeti (tesis işletim maliyeti),

vcr_i $i \in R$ düğümünde bulunan geri kazanım tesisinin değişken maliyeti (tesis işletim maliyeti),

vcd_i $i \in D$ düğümünde bulunan geri kazanım tesisinin değişken maliyeti (tesis işletim maliyeti),

ft_{ki} $i \in T$ düğümünde $k \in K$ atık işleme teknolojisine sahip bir tesisin açılması için sabit maliyet,

fd_i $i \in D$ düğümünde bertaraf etme tesisinin açılması için sabit maliyet,

fr_i $i \in R$ düğümünde geri kazanım tesisinin açılması için sabit maliyet,

g_{ai} $i \in G$ tehlikeli atık üretim merkezinde ortaya çıkan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

α_a $i \in G$ tehlikeli atık üretim merkezinde ortaya çıkan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık için geri kazanım oranı,

φ_{ai} $i \in R$ tehlikeli atık geri kazanım merkezinde ortaya çıkan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık için atık kalıntısı oranı,

β_{ak} $k \in K$ atık işleme teknolojisi ile işlem gören $a \in Z$ tipi tehlikeli atık için geri kazanım oranı,

r_{ak} $k \in K$ atık işleme teknolojisi ile işlem gören $a \in Z$ tipi tehlikeli atık için kütle azaltma oranı,

A_{aik} $a \in Z$ tehlikeli atık tipinin $i \in T$ atık işleme tesisinde $k \in K$ atık işleme teknolojisi ile işlenmesinden elde edilen enerji kazanımının birim değeri,

MM_{ai} $a \in Z$ tehlikeli atık tipinin $i \in R$ düğümünde geri kazanımı ile elde edilen kazancın birim değeri,

ut_{ki} $k \in K$ atık işleme teknolojisine sahip $i \in T$ atık işleme yerinin kapasitesi,

ur_i $i \in R$ geri kazanım tesisinin kapasitesi,

ud_i $i \in D$ bertaraf etme tesisinin kapasitesi,

ψt_{aijl} (i,j) hattında $a \in Z$ tipi tehlikeli atık taşınması nedeniyle $l \in L$ yerleşim yerinde etkilenmesi olası insan nüfusu,

ψr_{aijl} (i, j) hattında $a \in Z$ tipi geri kazanım malzemesi taşınması nedeniyle $l \in L$ yerleşim yerinde etkilenmesi olası insan nüfusu,

ψd_{ijl} (i, j) hattında taşınan atık kalıntısı taşınması nedeniyle yerleşim yerinde $l \in L$ etkilenmesi olası insan nüfusu,

bt_{ij} j yerleşim yerine bir atık işleme tesisinin kurulmasının i yerleşim yerine neden olacağı istenmeyen etki,

br_{ij} j'ye bir geri dönüşüm tesisi kurulmasının i yerleşim yerine neden olacağı istenmeyen etki,

bd_{ij} j'ye bir bertaraf etme tesisi kurulmasının i yerleşim yerine neden olacağı istenmeyen etki,

ωt_l Atık işleme tesisi kurulması nedeniyle $l \in V$ yerleşim yerinin maruz kaldığı istenmeyen etkinin eşik değeri,

ωr_l Geri kazanım tesisi kurulması nedeniyle $l \in V$ yerleşim yerinin maruz kaldığı istenmeyen etkinin eşik değeri,

ωd_l Atık bertaraf etme tesisi kurulması nedeniyle $l \in V$ yerleşim yerinin maruz kaldığı istenmeyen etkinin eşik değeri,

τt_{al} Atık işleme tesislerine $a \in Z$ tipi tehlikeli atık taşınması nedeniyle güzergâh boyunca yerleşik nüfusun maruz kaldığı istenmeyen etki eşik değeri,

τr_a Geri kazanım tesislerine $a \in Z$ tipi tehlikeli atık taşınması nedeniyle güzergâh boyunca yerleşik nüfusun maruz kaldığı istenmeyen etki eşik değeri,

τd Tehlikeli atık kalıntısının taşınması nedeniyle güzergâh boyunca yerleşik nüfusun maruz kaldığı istenmeyen etki eşik değeri,

tt Açılması istenilen maksimum atık işleme tesisi sayısı,

vv Açılması istenilen maksimum geri kazanım tesisi sayısı,

nn Açılması istenilen maksimum atık bertaraf etme tesisi sayısı,

ET_j Atık işleme tesislerinin j yerleşim yerini maruz bıraktığı toplam bireysel olumsuz etki,

ER_j Geri kazanım tesislerinin j yerleşim yerini maruz bıraktığı toplam bireysel olumsuz etki,

ED_j Bertaraf etme tesislerinin j yerleşim yerini maruz bıraktığı toplam bireysel olumsuz etki,

lot_{ki} $i \in T$ tesis yerleşim yerinde $k \in K$, atık işleme teknolojisi içeren atık işleme tesisinin kurulması için tesise gelmesi gereken minimum tehlikeli atık miktarı,

lor_i $i \in T$ tesis yerleşim yerinde tehlikeli atık geri kazanım tesisinin kurulması için tesise gelmesi gereken minimum geri kazanım maddesi miktarı,

lod_i $i \in D$ yerleşim yerinde tehlikeli atık bertaraf etme tesisi kurulabilmesi için gereken minimum tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

ETT Atık işleme tesislerinin toplam bireysel olumsuz etki eşiği,

EDT Bertaraf etme tesislerinin toplam bireysel olumsuz etki eşiği,

ERT Geri kazanım tesislerinin toplam bireysel olumsuz etki eşiği.

Karar değişkenleri

x_{aij} (i, j) hattında taşınan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

yra_{ij} Atık işleme tesislerinden gelen geri kazanım maddelerinin geri kazanım tesisinden $(i, j) \in A$, $i \in R, j \in D$ hattında taşınan tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

yrb_{ij} Atık üretim merkezlerinden gelen geri kazanım maddelerinin geri kazanım tesisinden $(i, j) \in A$, $i \in R, j \in D$ hattında taşınan tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

yt_{ij} Atık işleme tesisinden $(i, j) \in A$, $i \in T, j \in D$ hattında taşınan tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

mg_{aij} $(i, j) \in A$, $i \in G, j \in R$ hattında taşınan geri kazandırılan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

mt_{aij} $(i, j) \in A$, $i \in T, j \in R$ hattında taşınan geri kazandırılan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı.

Değişkenler

θ_{aki} $i \in T$ düğümünde k teknolojisi ile işleme tabi tutulan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

dt_i atık işleme tesisinde oluşan $i \in D$ düğümünde bertaraf edilen tehlikeli atık miktarı,

dra_i atık işleme tesislerinden gelen geri kazanım maddelerinin, geri kazanım tesisinde oluşan $i \in D$ düğümünde bertaraf edilen tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

drb_i atık üretim merkezlerinden gelen geri kazanım maddelerinin geri kazanım tesisinde oluşan $i \in D$ düğümünde bertaraf edilecek tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

δr_{ai} Atık üretim merkezlerinden gelen, $i \in R$ düğümünde geri kazanım işlemine uğrayan a tipi tehlikeli atık miktarı,

δt_{ai} Atık işleme tesislerinden gelen, $i \in R$ düğümünde geri kazanım işlemine uğrayan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

f_{ki} $i \in T$ düğümüne k atık işleme teknolojisi bulunan atık işleme tesisi yerleştirilmişse 1; diğer durumda 0,

n_i $i \in D$ düğümüne bertaraf etme tesisi yerleştirilmişse 1; diğer durumda 0,

v_i $i \in R$ düğümüne geri kazanım tesisi yerleştirilmişse 1; diğer durumda 0,

Ws_{aki} $a \in Z$ tipi tehlikeli atık tipi $i \in T$ yerleşim yerinde $k \in K$ atık işleme teknolojisi uyumlu ile işlem görüyor ise 1, diğer durumlarda 0'dır.

<u>*Matematiksel model*</u>

Min TM

$$\sum_i \sum_k ft_{ki} f_{ki} + \sum_i fd_i n_i + \sum_i fr_i v_i + \sum_{(i,j)\in A} \sum_a ca_{ij} x_{aij} + \sum_{(i,j)\in A} \sum_a cb_{ij} mg_{aij} + \sum_{(i,j)\in A} cd_{ij} yt_{ij}$$

$$+ \sum_{(i,j)\in A} \sum_a cr_{ij} mt_{aij} + \sum_{(i,j)\in A} cs_{ij} yra_{ij} + \sum_{i,j} cs_{ij} yrb_{ij} + \sum_i \sum_a \sum_k vct_{ki} \theta_{aik} + \sum_i \sum_a vcr_i \delta r_{ai}$$

$$+ \sum_i \sum_a vcr_i \delta t_{ai} + \sum_i vcd_i dt_i + \sum_i vcd_i dr_i - \sum_i \sum_a \sum_k A_{aik} dt_i - \sum_i \sum_a M_{ai} \delta t_{ai}$$

$$- \sum_i \sum_a M_{ai} \delta r_{ai} \qquad (3.1)$$

<u>*Kısıtlar*</u>

Atık üretim merkezlerinden atık işleme tesislerine atık akışı kısıtı,

$$(1-\alpha_a) g_{ai} - \sum_k \theta_{aki} = \sum_{j:(i,j)\in A} x_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} x_{aji}, \quad a \in Z;\ i \in V \qquad (3.2)$$

Atık üretim merkezlerinden atık geri kazanım tesislerine geri kazanım maddesi akışı kısıtı,

$$(1-\varphi_a)\alpha_a g_{ai} - \delta r_{ai} = \sum_{j:(i,j)\in A} mg_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} mg_{aji}, \qquad a \in Z;\ i \in V \qquad (3.3)$$

Atık işleme tesislerinden atık geri kazanım tesislerine geri kazanım maddesi akışı kısıtı,

$$\sum_k (1-\varphi_a)\beta_{ak}\theta_{aik} - \delta t_{ai} = \sum_{j:(i,j)\in A} mt_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} mt_{aji}\,, \quad a \in Z\,;\ i \in V \tag{3.4}$$

Atık işleme tesislerinden bertaraf etme tesislerine atık kalıntısı akışı kısıtı,

$$\sum_k \sum_a \theta_{aki}(1-r_{ak})(1-\beta_{ak}) - dt_i = \sum_{j:(i,j)\in A} yt_{ij} - \sum_{j:(j,i)\in A} yt_{ji}\,, \qquad i \in V \tag{3.5}$$

Atık işleme tesislerinden atık geri kazanım tesislerine gelen geri kazanım maddelerinden, yapılan işlem sonrası bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı akışı kısıtı,

$$\sum_a \sum_k \varphi_a \beta_{ak}\theta_{aik} - dra_i = \sum_{j:(i,j)\in A} yra_{ij} - \sum_{j:(j,i)\in A} yra_{ji}\,, \qquad i \in V \tag{3.6}$$

Atık üretim merkezlerinden atık geri kazanım tesislerine gelen geri kazanım maddelerinden, yapılan işlem sonrası bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı akışı kısıtı,

$$\alpha_a g_{ai}\varphi_a - drb_{ai} = \sum_{j:(i,j)\in A} yrb_{ij} - \sum_{j:(j,i)\in A} yrb_{ji}\,, \qquad a \in Z\,,\ i \in V \tag{3.7}$$

Kapasite kısıtları,

$$\sum_a \theta_{aki} \le ut_{ki} f_{ki}\,, \qquad k \in K\,,\ i \in T \tag{3.8}$$

$$dt_i + dra_i + drb_{ai} \le ud_i n_i\,, \qquad i \in D \tag{3.9}$$

$$\sum_a \delta r_{ai} + \sum_a \delta_{ai} \le ur_i v_i\,, \qquad i \in R \tag{3.10}$$

Teknoloji uyumluluğu kısıtları,

$$\sum_a Ws_{aki} - f_{ki} \ge 1\,, \qquad k \in K\,,\ i \in T \tag{3.11}$$

$$Ws_{aki} - f_{ki} \le 0\,,\ a \in Z\,,\ k \in K\,,\ i \in T \tag{3.12}$$

$$\theta_{aki} \le ut_{ki} Ws_{aki}\,,\ a \in Z\,,\ k \in K\,,\ i \in T \tag{3.13}$$

Atık-atık uyumluluğu kısıtı,

$$Ws_{ski} + Ws_{hki} \le 1\,, \qquad s \in S\,,\ h \in H\,,\ k \in K\,,\ i \in T \tag{3.14}$$

Mevcut tesisler kısıtları

$$f_{ki} = 1\,, \qquad k \in K\,,\ i \in TA \tag{3.15}$$

$$n_i = 1\,, \qquad i \in DA \tag{3.16}$$

$$v_i = 1\,, \qquad i \in R \tag{3.17}$$

Aday tesis yerleri dışında tesis açılmaması kısıtları,

$$\sum_a \sum_k \theta_{aki} = 0\,, \qquad i \in (V - T) \tag{3.18}$$

$$dt_i = 0, \qquad i \in (V - D) \tag{3.19}$$

$$dra_i = 0, \qquad i \in (V - D) \tag{3.20}$$

$$drb_i = 0, \qquad i \in (V - D) \tag{3.21}$$

$$\sum_a \delta t_{ai} = 0, \quad i \in (V - R) \tag{3.22}$$

$$\sum_a \delta r_{ai} = 0, \quad i \in (V - R) \tag{3.23}$$

Ulaştırma istenmeyen etkisi kısıtları,

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi t_{aijl} x_{aij} \le \tau t_a, \qquad a \in Z \tag{3.24}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi r_{aijl} mt_{aij} \le \tau r_a, \qquad a \in Z \tag{3.25}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi r_{aijl} mg_{aij} \le \tau r_a, \qquad a \in Z \tag{3.26}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \psi d_{ijl} yt_i \le \tau d, \qquad i \in T \tag{3.27}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \psi d_{ijl} yr_i \le \tau d, \qquad i \in R \tag{3.28}$$

Tesis istenmeyen etkisi kısıtları,

$$\sum_{i\in T} \sum_k POPt_{ki} f_{ki} \le \omega t_l, \quad l \in L \tag{3.29}$$

$$\sum_{i\in R} PO\Pr_i v_i \le \omega r_l, \; l \in L \tag{3.30}$$

$$\sum_{i\in D} POPd_i n_i \le \omega d_l, \; l \in L \tag{3.31}$$

Denge kısıtları,

$$ET_l = \sum_{i\in T} \frac{\sum_{k\in K} ut_{ki} f_{ki}}{ds_{li}}, \; l \in L \tag{3.32}$$

$$ER_l = \sum_{i\in R} \frac{ur_i v_i}{ds_{li}}, \quad l \in L \tag{3.33}$$

$$ED_l = \sum_{i\in D} \frac{ud_i n_i}{ds_{li}}, \quad l \in L \tag{3.34}$$

$$ET_l \le ETT, \quad l \in L \tag{3.35}$$

$$ER_l \le ERT, \; l \in L \tag{3.36}$$

$$ED_l \le EDT, \; l \in L \tag{3.37}$$

Açılmasına izin verilen maksimum tesis sayısı kısıtları,

$$\sum_i \sum_k f_{ki} \le tt \,, \tag{3.38}$$

$$\sum_i v_i \le vv \,, \tag{3.39}$$

$$\sum_i n_i \le nn \,, \tag{3.40}$$

Tesislerin belirli miktar atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı talebi olmadan açılamayacağını belirten kısıtlar,

$$\sum_a \theta_{aki} \ge lot_{ki} f_{ki} \,, \qquad k \in K \,,\ i \in T \tag{3.41}$$

$$dt_i + dr_i \ge lod_i n_i \,, \qquad i \in D \tag{3.42}$$

$$\sum_a \delta r_{ai} + \sum_a \delta_{ai} \ge lor_i v_i \,, \qquad i \in R \tag{3.43}$$

0-1 değişkenlerle ilgili kısıtlar,

$$f_{ki} \in \{0,1\},\ k \in K \,,\ i \in T \tag{3.44}$$

$$fd_i \in \{0,1\},\ i \in D \tag{3.45}$$

$$fr_i \in \{0,1\},\ i \in R \tag{3.46}$$

$$Ws_{ski}, Ws_{zki} \in \{0,1\},\ s \in S \,,\ h \in H \,,\ k \in K \,,\ i \in T \tag{3.47}$$

İşaret kısıtları,

$$\theta_{aki} \ge 0 \ ,\ a \in Z \,,\ k \in K \,,\ i \in T \tag{3.48}$$

$$x_{aij}, yt_{ij}, yra_{ij}, yrb_{ij}, mt_{aij}, mg_{aij} \ge 0, \qquad a \in Z \,,\ (i,j) \in A \tag{3.49}$$

$$dt_i \ge 0 \,,\ i \in D \tag{3.50}$$

$$dra_i \ge 0 \,,\ i \in D \tag{3.51}$$

$$drb_i \ge 0 \,,\ i \in D \tag{3.52}$$

$$\delta r_{ai}, \delta t_{ai} \ge 0 \,,\ a \in Z \,,\ i \in R \tag{3.53}$$

$$ET_j, ER_j, ED_j \ge 0 \tag{3.54}$$

Modelde amaç fonksiyonu Eş. 3.1, arıtma tesisi, geri kazanım tesisi ve bertaraf etme tesislerinin tesis kurulum maliyetleri, tesis değişken maliyetleri ve tehlikeli atıkların tesisler arasında taşıma maliyetleri toplamını en küçüklemekte; atık işleme tesislerinde elde edilen enerji kazanım kazancı ve geri kazanım tesislerinde elde edilen geri kazanım kazancını en büyüklemektedir.

Eş. (3.2) - Eş. (3.7) arasındaki kısıtlar akış denge kısıtlarıdır.
Eş. (3.8) - Eş. (3.10) arasındaki kısıtlar tesis kapasite kısıtlarıdır.
Eş. (3.11) - (3.12) arasındaki kısıtlar, atıkların atık teknolojileri ile uyumluluğu kısıtlarıdır.
Eş. (3.13) kısıt atık işleme tesislerinin atık teknolojisine uyumlu işlem yapmasını sağlayan kısıttır.
Eş. (3.14) kısıt atık işleme tesislerinde birlikte işlem göremeyecek atıkların atık-atık uyumsuzluğunu belirten kısıttır.
Eş. (3.15) - Eş. (3.17) nolu kısıtlar, mevcut kurulu tesisleri ifade eden kısıtlardır.
Eş. (3.18) - Eş. (3.23) nolu kısıtlar, ilgili tesisler dışında işlem yapılmamasını sağlayan kısıtlardır.
Eş. (3.24) - Eş. (3.28) arasındaki kısıtlar, ulaştırma risk (istenmeyen etki) kısıtlarıdır.
Eş. (3.29) - Eş. (3.31) arasındaki kısıtlar, tesis risk (istenmeyen etki) kısıtlarıdır.
Eş. (3.32) - Eş. (3.37) arasındaki kısıtlar, denge kısıtlarıdır.
Eş. (3.38) - Eş. (3.40) arasındaki kısıtlar, en fazla açılacak tesis kısıtlarıdır.
Eş. (3.41) - Eş. (3.43) arasındaki kısıtlar, tesislerin belirli miktar atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı talebi olmadan açılamayacağını belirten kısıtlardır.
Eş. (3.44) - Eş. (3.46) arasındaki kısıtlar, 0-1 değişkenleri belirten kısıtlardır.
Eş. (3.47) - Eş. (3.54) arasındaki kısıtlar, işaret (sıfır veya pozitif olma) kısıtlarıdır.

3.2. Deneysel Çalışma

Bu bölümde, geliştirilen modelin çözüm performansını belirleyebilmek amacıyla yapılan deneysel çalışma sonuçları verilmektedir. Deneysel çalışmada, modelin farklı problemlerle test edilebilmesi amacıyla her problem için geçerli veriler üretilebilen bir veri üretim mekanizması geliştirilmiştir. Geliştirilen bu mekanizma problem içeriği ile uyumlu rassal veriler üretmektedir. Modelin anlaşılabilmesi için küçük çaplı örnek bir problem incelenmekte; sonrasında, modelin doğrulanması amacıyla, 36 farklı problem 10'ar kez çözülerek elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir.

3.2.1. Test problemleri için geliştirilen veri üretim mekanizması

Her problem için rassal olarak oluşturulan N = (V, A) grid ağı üzerine, rassal olarak düğümler bir koordinat sistemi ile rastgele yerleştirilerek elde edilmektedir. Test

problemleri için düzgün dağılım ile elde edilen (0, 500) birim arasında değerler alan 10, 50 ve 100 düğümlü rassal ağlar kullanılmaktadır. Düğümler arasındaki mesafeler, ağ üzerinde yer alan ve aralarında hat bulunan düğüm noktalarının koordinatlarından faydalanarak öklit mesafelerinin bulunması ile hesaplanmaktadır. Dolayısı ile x ve y noktaları arasındaki mesafe $d(x,y)$,

$d(x,y) = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2}$ ile elde edilmektedir.

Test problemlerinde, G = {1,…,i} ve $i \in G$ tehlikeli atık üretim merkezinde; $a \in Z$ tehlikeli atık tipi ve g_{ai} atık üretim miktarı olmak üzere, en büyük etkinin değerlendirilebilmesi için atık üretim merkezlerinde [$g^{\min}{}_{ai}$, $g^{\max}{}_{ai}$] aralığında rassal olarak atık üretilmektedir. Çalışmada, 10, 50 ve 100 düğümlü ağlarda düğüm sayısı kadar olduğu kabul edilen $i \in G$ tehlikeli atık üretim merkezlerinde, [50, 150] aralığında düzgün dağılımla elde edilen, $a \in Z$, $a = 3$ veya $a = 4$ tehlikeli atık tipinin, $k \in K$, $k = 2$ veya $k = 3$ atık işleme teknolojisi ile işlem gördüğü kabul edilmektedir. T = {1,…,t}, $t \in T$ aday atık işleme tesis yerleri; D = {1,…,dt}, $dt \in D$ aday bertaraf etme tesis yerleri ve R = {1,…,rt}, $dr \in R$ aday geri kazanım tesis yerleri olmak üzere, düğüm sayılarının %20, %50 ve %80'i kadar aday tesis yerleri ağ içindeki düğümler arasından rassal olarak belirlenmektedir. En fazla açılabilir tesis sayısı ise düğüm sayısının %10'u olarak kabul edilmiştir. Atık işleme tesislerinde $a_1 \in Z$ ve $a_2 \in Z$ atıklar birlikte işlenememektedir.

Tesis kapasiteleri ut_{ki}, ur_i ve ud_i açılacak tesis tipine göre farklılık göstermektedir. Kapasiteler, Cappanera ve diğerlerinin test problemlerinde kullandığı yönteme [1] benzer geliştirilen yöntem ile hesaplanmaktadır. Atık işleme tesisi, geri dönüşüm tesisi ve bertaraf etme tesisi ile ilgili sınıflama ve hesaplamalarda Çizelge 3.1'de belirtilen esaslar ve oranlar göz önüne alınarak parametreler üretilmektedir.

Ω, belirlenen (a,b) aralığında rassal tamsayı üreten bir fonksiyon ise,
k teknolojisine sahip i yerleşim yerine yerleştirilen bir atık işleme tesisinin kapasitesi;
st_k, k teknolojisine sahip açılacak atık işleme tesisi oranı ve

$$\Delta ut_k = \frac{\sum_{i\in G}\sum_{a\in Z}(1-\alpha_a)g_{ai}}{st_k|T|}\ ,\ k \in K \text{ olmak üzere,}$$

$ut_{ki} = \Delta ut_k + \Omega(0, \Delta ut_k)$, $k \in K$ ve $i \in T$ ile,

i yerleşim yerine yerleştirilen bir atık geri kazanım tesisinin kapasitesi, sr açılacak geri kazanım tesisi oranı ve

$$\Delta ur = \frac{\sum_{i\in G}\sum_{a\in Z}(1-\varphi_a)\alpha_a g_{ai} + \sum_{i\in G\cup T}\sum_{a}\sum_{k}(1-\varphi_a)(1-\alpha_a)\beta_{ak}g_{ai}}{sr|R|}, \text{ olmak üzere,}$$

$ur_i = \Delta ur + \Omega(0, \Delta ur)$, $i \in R$ ile

i yerleşim yerine yerleştirilen bir atık bertaraf etme tesisinin kapasitesi, sd açılacak atık bertaraf etme tesisi oranı ve

$$\Delta ud = \frac{\sum_{i\in G\cup T}\sum_{a\in Z}\sum_{k}[(1-\alpha_a)(1-\beta_{ak})(1-r_{ak})g_{ai}] + \sum_{i\in G\cup R}\sum_{a\in Z}\varphi_a\alpha_a g_{ai}}{sd|D|}, \text{ olmak üzere,}$$

$ud_i = \Delta ud + \Omega(0, \Delta ud)$, $i \in D$ ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.1. Tesislerin test problemleri için kabul edilen kapasite, maliyet, istenmeyen etki ve kazanç seviyeleri ve rassal hesaplamalarında kullanılan oranlar

Tesis	Kapasite	Maliyet	İstenmeyen Etki	Kazanç
Atık İşleme Tesisi	Yüksek (1)	Yüksek (1)	Yüksek (1)	Düşük (0.2)
Geri Dönüşüm Tesisi	Düşük (0.2)	Yüksek (1)	Düşük (0.2)	Orta (0.4)
Bertaraf Etme Tesisi	Orta (0.4)	Orta (0.8)	Orta (0.8)	Yok

Tesis açılması için tesislere gelmesi gereken atık, geri kazanım malzemesi ve atık kalıntısı miktarları lot_{ki}, lor_i ve lod_i; atık işleme tesisi, atık geri kazanım tesisi ve atık bertaraf etme tesislerinin tesis açılım alt sınır belirleme oranları ξ^t, ξ^r ve ξ^d olmak üzere, aşağıda belirtilen eşitliklerle belirlenmektedir. Test problemlerinde $\xi^t = 0{,}2$; $\xi^r = 0{,}2$ ve $\xi^d = 0{,}1$ alınmaktadır.

$$lot_{ki} = \xi^t * (ut_{ki} + \Omega(-\Delta ut_{ki}, \Delta ut_{ki})$$
$$lor_i = \xi^r * (ur_i + \Omega(-\Delta ur_i, \Delta ur_i)$$
$$lod_i = \xi^d * (ud_i + \Omega(-\Delta ud_i, \Delta ud_i)$$

Tesis kurulum maliyetleri ft_{ki}, fr_i ve fd_i; atık işleme tesisi, atık geri kazanım tesisi ve atık bertaraf etme tesislerinin maliyet oranları Γ^t, Γ^r ve Γ^d olmak üzere, aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde Çizelge 3.1'de yer alan kabul dikkate alınarak $\Gamma^t = 20$; $\Gamma^r = 8$ ve $\Gamma^d = 3$ alınmaktadır.

$$ft_{ki} = \Gamma^t * (ut_{ki} + \Omega(-\Delta ut_{ki} * 0{,}2, \Delta ut_{ki} * 0{,}2)$$
$$fr_i = \Gamma^r * (ur_i + \Omega(-\Delta ur_i * 0{,}2, \Delta ur_i * 0{,}2)$$
$$fd_i = \Gamma^d * (ud_i + \Omega(-\Delta ud_i * 0{,}2, \Delta ud_i * 0{,}2)$$

Tesis değişken maliyetleri vct_{ki}, vcr_i ve vcd_i; atık işleme tesisi, atık geri kazanım tesisi ve atık bertaraf etme tesislerinin değişken maliyet oranları ψ^t, ψ^r ve ψ^d olmak üzere, aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde Çizelge 3.1'de yer alan kabul dikkate alınarak $\psi^t = 0{,}2$; $\psi^r = 0{,}1$ ve $\psi^d = 0{,}05$ alınmaktadır.

$$vct_{ki} = \psi^t * (ut_{ki} + \Omega(-\Delta ut_{ki} * 0{,}5, \Delta ut_{ki} * 0{,}5)$$
$$vcr_i = \psi^r * (ur_i + \Omega(-\Delta ur_i * 0{,}5, \Delta ur_i * 0{,}5)$$
$$vcd_i = \psi^d * (ud_i + \Omega(-\Delta ud_i * 0{,}5, \Delta ud_i * 0{,}5)$$

Enerji kazanımı ve geri kazanım kazancı A_{aik} ve MM_{ai}; atık işleme tesisinde enerji kazanımı ve atık geri kazanım tesisinde elde edilen kazanç oranları E^{at} ve E^{ar} olmak

üzere, aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde Çizelge 3.1'de yer alan kabul dikkate alınarak $E^{at} = 0{,}02$ ve $E^{ar} = 0{,}04$ alınmaktadır.

$$A_{aik} = E^{at} * (ut_{ki} + \Omega(-\Delta ut_{ki} * 0{,}2, \Delta ut_{ki} * 0{,}2)$$
$$MM_{ai} = E^{ar} * (ur_i + \Omega(-\Delta ur_i * 0{,}5, \Delta ur_i * 0{,}5)$$

Taşıma maliyetleri ca_{ij}, cb_{ij}, cr_{ij}, cd_{ij} ve cs_{ij}; atık işleme tesisi, atık geri kazanım tesisi ve atık bertaraf etme tesislerinden tehlikeli atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı taşıma maliyet oranları ϕ^t, ϕ^r ve ϕ^d olmak üzere; aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $\phi^t = 2$; $\phi^r = 1$ ve $\phi^d = 1{,}5$ alınmaktadır.

$$ca_{ij} = \phi^t * (d[(x_{1i}, y_{1j}) + (x_{2i}, y_{2j})])$$
$$cb_{ij} = \phi^r * (d[(x_{1i}, y_{1j}) + (x_{2i}, y_{2j})])$$
$$cr_{ij} = \phi^r * (d[(x_{1i}, y_{1j}) + (x_{2i}, y_{2j})])$$
$$cd_{ij} = \phi^d * (d[(x_{1i}, y_{1j}) + (x_{2i}, y_{2j})])$$
$$cs_{ij} = \phi^d * (d[(x_{1i}, y_{1j}) + (x_{2i}, y_{2j})])$$

Tesis yerleşim ve tehlikeli atık taşıma istenmeyen etkileri, atık tipine göre belirli bir etki alanı içinde yer alan nüfus esas alınarak belirlenmektedir. Test problemlerinde, sabit tesisler için istenmeyen etkiler, yerleşim yerlerinin (a,b) aralığında düzgün dağılımla tamsayı üreten bir fonksiyon ile üretilen nüfusları kabul edilmektedir. Yollar için ise tehlikeli atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntıları için ayrı ayrı olmak üzere $(i, j) \in A$ için taşınan maddelerden etkilenmesi muhtemel (c,d) aralığında düzgün dağılımla tamsayı üreten bir fonksiyon ile elde edilen nüfus değeri ile taşınan madde miktarının çarpımından elde edilen değer kullanılmaktadır. Problemlerde, etkilenen nüfus değerlerinin üretilmesinde (2 000, 5 000) ve (5 000, 10 000) aralıklarında, düzgün dağılımla elde edilen veriler kullanılmaktadır.

Taşıma ve tesis yerleşim istenmeyen etki eşik değerleri, Cappanera ve diğerlerinin kullandığı ölçütlerden "toplam" ölçütü [1] esas alınarak belirlenmektedir. Buna göre,

pt_i, bütün tehlikeli atık işleme tesislerinin yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, atık işleme tesisinin istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $pt_i = 0{,}4$ alınmaktadır.

$$\omega t = pt_i \sum_{i \in T} \sum_{k} POPt_{ki}, \quad i \in T$$

pr_i, bütün geri dönüşüm tesislerinin yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, geri kazanım tesisinin istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $pr_i = 0{,}4$ alınmaktadır.

$$\omega r = pr_i \sum_{i \in R} PO\,\mathrm{Pr}_i, \quad i \in R$$

pd_i, bütün atık bertaraf tesislerinin yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, bertaraf etme tesisi istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $pd_i = 0{,}4$ alınmaktadır.

$$\omega d = pd_i \sum_{i \in D} POPd_i, \quad i \in D$$

nt, toplam tehlikeli atık işleme tesislerine taşınan tehlikeli atığın yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, taşınan atığın l yerleşim yerine istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $nt = 0{,}4$ alınmaktadır.

$$\tau t_l = nt \sum_{(i,j) \in A} \sum_{a} \psi t_{aijl} (1-\alpha) g_{ai}, \quad l \in L,$$

nr, toplam tehlikeli atık geri kazanım tesislerine taşınan tehlikeli atığın yerleşim yerlerine en büyük istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, taşınan atığın l yerleşim yerine istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $nr = 0{,}4$ alınmaktadır.

$$\tau r_l = nr \sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi r_{aijl} (\alpha_a g_{ai} + \sum_k \beta_{ak} (1-\varphi_a)\theta_{aik}), \quad l \in L$$

nd, toplam tehlikeli atık bertaraf etme tesislerine taşınan tehlikeli atık kalıntısının yerleşim yerlerine en büyük istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, taşınan atık kalıntısının l yerleşim yerine istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $nd = 0{,}4$ alınmaktadır.

$$\tau d_l = nd \sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi d_{ijl} (\sum_k \theta_{aki}(1-r_{ak})(1-\beta_{ak}) + \alpha_a g_{ai} \varphi_a + \sum_k \varphi_a \beta_{ak} \theta_{aki}), \quad l \in L.$$

Tesislerin yerleşimi nedeniyle yerleşim yerlerine olan istenmeyen etkinin topluma adil dağıtımını ifade eden denge, atık işleme tesisleri, geri kazanım tesisleri ve atık bertaraf etme tesisler için ET_l, ER_l ve ED_l ile hesaplanmaktadır. Bu değerler için Λ_t, Λ_r ve Λ_d yerleşim yerleri katsayısı olmak üzere, atık işleme tesisleri, geri kazanım tesisleri ve bertaraf etme tesisleri eşik değerleri ETT, ERT ve EDT aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $\Lambda_t = 1$; $\Lambda_r = 0{,}8$ ve $\Lambda_d = 0{,}5$ alınmaktadır.

$$ETT = \frac{\sum_{l\in L} \sum_{i\in T} \frac{\sum_{k\in K} ut_{ki}}{ds_{li}}}{\Lambda_t |L|}, \; k \in K, \; t \in T$$

$$ERT = \frac{\sum_{l\in L} \sum_{i\in R} \frac{ur_i}{ds_{li}}}{\Lambda_r |L|}, \; r \in R$$

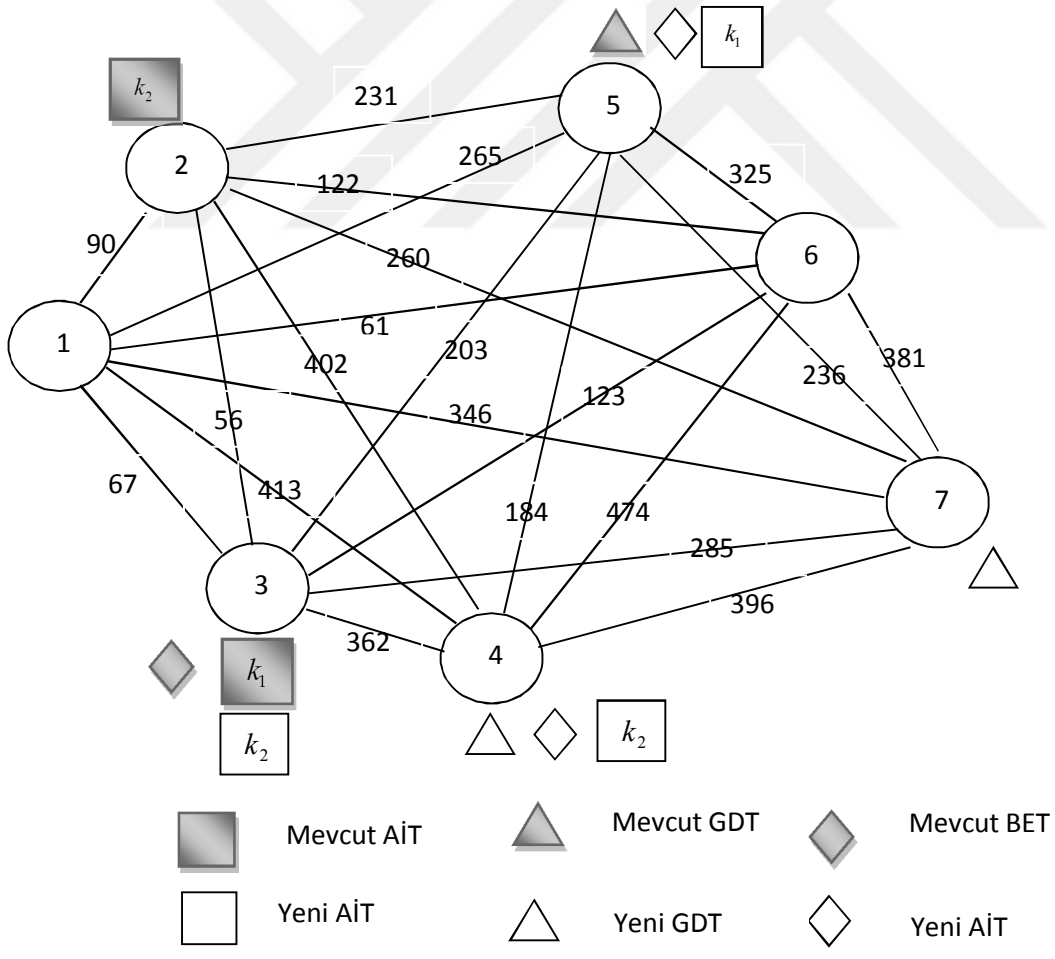
$$EDT = \frac{\sum_{l\in L} \sum_{i\in D} \frac{ud_i}{ds_{li}}}{\Lambda_d |L|}, d \in D$$

3.2.2. Örnek problem

Modelin anlaşılırlığını kolaylaştırmak için 7 düğümlü örnek bir ağ üzerinde uygulama yapılmaktadır (Şekil 3.2). Test problemleri ile aynı esaslarla üretilmiş veriler kullanılmaktadır. 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı düğümler aday yerleşim yerleri olarak

belirlenmektedir. Yerleşim yerleri arasındaki mesafeler Çizelge 3.2'de; atık tipi bazında üretilen atık miktarları Çizelge 3.3'te; tehlikeli atık geri kazanım ve atık kalıntısı oranları Çizelge 3.4'tedir.

Intel CORE i5-4200U 1,6 Ghz işlemci ile GAMS 148 CPLEX 10.2.0 yazılımı kullanılarak 0,700 sn.de elde edilen çözümde 510 932,05 birim maliyet ile optimum sonuç elde edilmektedir. Problemle ilgili GAMS/CPLEX kodu EK-1'de, çözümü EK-2'de sunulmaktadır. Sonuçlar; Şekil 3.2'de yerleşim yerleri ağı, mesafe, kurulu/yeni kurulan tesisler; Şekil 3.3'de atık üretim merkezlerinden geri kazanım ve atık işleme tesislerine akışı; Şekil 3.4'te geri kazanım maddelerinin akışı; Şekil 3.5'te atık kalıntısı akışı ve Şekil 3.6'da atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinde işlem gören madde miktarları olmak üzere özet olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Yerleşim yerleri, yol ağı ve mesafeler

Şekil 3.2'de, 2 ve 3'üncü düğümlerde mevcut iki adet tehlikeli atık işleme tesisi; 5'inci düğümde mevcut bir adet tehlikeli atık geri kazanım tesisi ve 3'üncü düğümde mevcut bir adet bertaraf etme tesisi bulunmaktadır. Problemin çözülmesi ile mevcut tesislere ilave olarak 3, 4, 5'inci düğümlere üç adet tehlikeli atık işleme tesisi; 4 ve 7'nci düğümlere iki adet geri kazanım tesisi; 4 ve 5'inci düğümlere iki adet bertaraf etme tesisi açılmaktadır.

Çizelge 3.2. Yerleşim yerleri arasında bulunan mesafeler

		Yerleşim Yerleri						
		1	2	3	4	5	6	7
Yerleşim Yerleri	1	0	90	67	413	265	61	346
	2	90	0	56	402	231	122	260
	3	67	56	0	362	203	123	285
	4	413	402	362	0	184	474	396
	5	265	231	203	184	0	325	236
	6	61	122	123	474	325	0	381
	7	346	260	285	396	236	381	0

Çizelge 3.3. Yerleşim yerlerinde üretilen atık miktarları

		Yerleşim Yerleri						
		1	2	3	4	5	6	7
Atık Tipleri	a_1	72	137	118	128	70	56	96
	a_2	108	97	124	66	145	129	61
	a_3	86	69	111	130	56	87	61

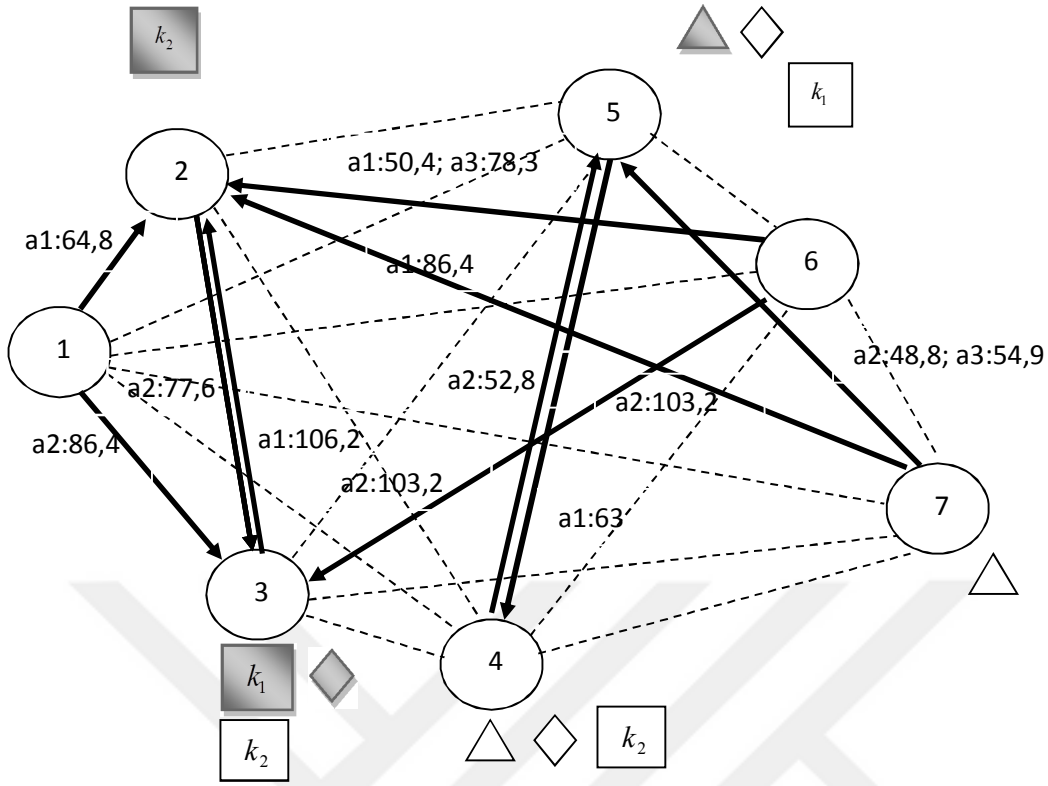
Şekil 3.3'te atık üretim merkezlerinde üretilen atıklar teknoloji tipi ile uyumlu olarak atık işleme tesislerine gönderilmektedir. Örneğin, 1'inci düğümde üretilen atıklardan k_1 teknolojisi ile uyumlu atıklar 3'üncü düğüme, k_2 teknolojisi ile uyumlu atıklar 2'nci düğüme gönderilmekte; benzer şekilde, 7'nci düğümde üretilen atıklardan k teknolojisi ile uyumlu atıklar 5'inci düğüme, k_2 teknolojisi ile uyumlu atıklar 2'nci düğüme gönderilmektedir.

Çizelge 3.4. Tehlikeli atık geri kazanım ve atık kalıntısı oranları

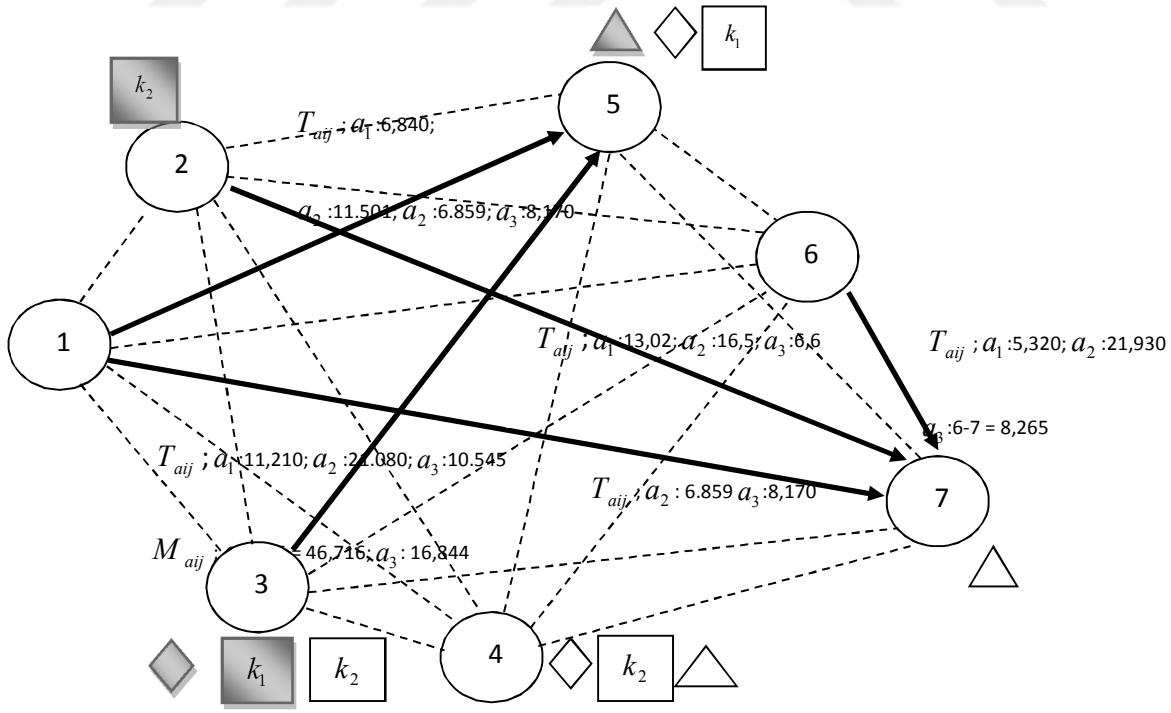
Atık Tipi	Atık İşleme Teknolojisi	Atık Üretim Merkezi Geri Kazanım Oranı	Atık İşleme Tesisi Geri Kazanım Oranı	Atık İşleme Tesisi Atık Kalıntısı Oranı	Geri Kazanım Tesisi Atık Kalıntısı Oranı	Kütle Azaltma Oranı
a_1	k_1	0,1	0,3	0,1	0,05	0,1
a_1	k_2	0,1	0,3	0,1	0,05	0,2
a_2	k_1	0,2	0,4	0,15	0,15	0,1
a_2	k_2	0,2	0,4	0,15	0,15	0,2
a_3	k_1	0,1	0,3	0,10	0,05	0,1
a_3	k_2	0,1	0,3	0,10	0,05	0,2

Şekil 3.4'te, atık üretim tesislerinden ve atık işleme tesislerinden atık geri kazanım tesislerine gönderilen geri kazanım maddeleri gösterilmektedir. Örneğin, 1'inci düğümde üretilen geri kazanım maddeleri 5 ve 7'nci düğümlerde bulunan geri kazanım tesislerine gönderilirken 2'ci düğümde bulunan atık işletim tesisinden 7'nci düğümde bulunan geri kazanım tesisine gönderilmektedir.

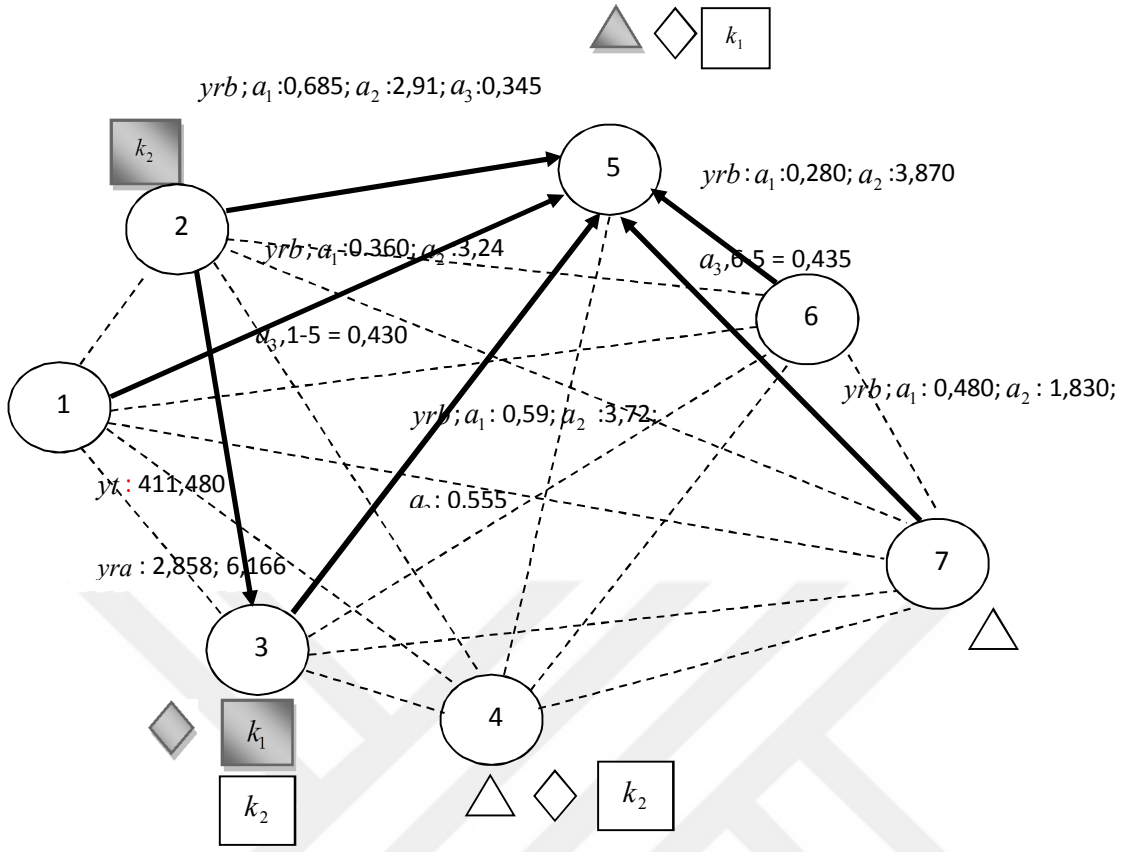
Şekil 3.5'te, bertaraf etme tesislerine gönderilen atık kalıntıları gösterilmektedir. Örneğin, 2'nci düğümde bulunan atık işleme tesisinden 5 ve 3'üncü düğümlerde bulunan bertaraf etme tesislerine; atık kalıntıları gönderilmektedir.



Şekil 3.3. Atık üretim merkezlerinden atık işleme tesislerine atık akışı

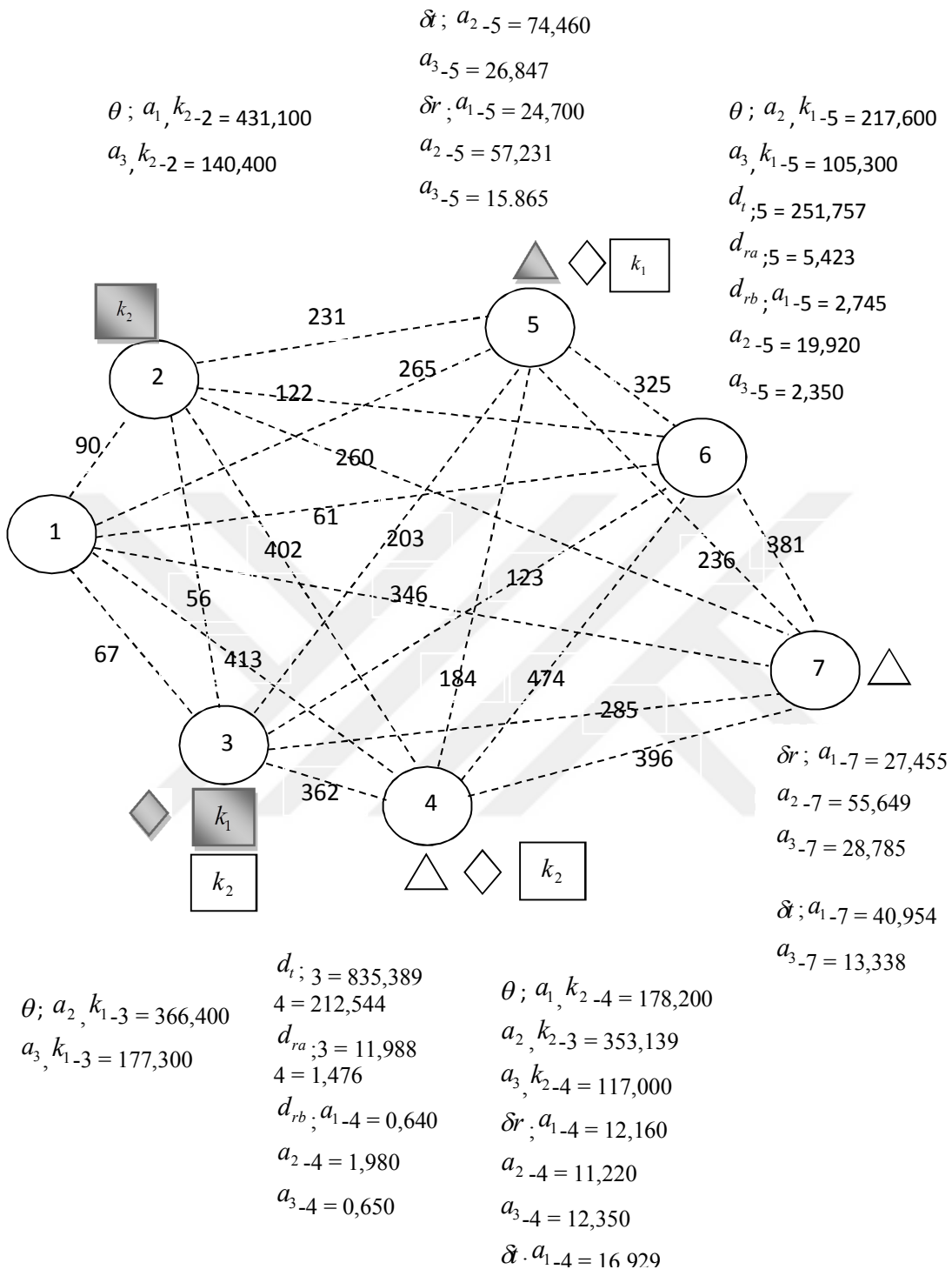


Şekil 3.4. Geri kazanım maddelerinin atık üretim merkezleri ve atık işleme tesislerinden geri kazanım tesislerine akışı



Şekil 3.5. Bertaraf etme tesislerine atık kalıntısı akışı

Şekil 3.6'da ise her tesiste işlem gören atık, geri dönüşüm maddesi ve atık kalıntısı miktarları gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinde işlem gören tehlikeli atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı miktarları

3.2.3. Test problemleri ve sonuçlarının değerlendirilmesi

Modelin doğrulamasının yapılabilmesi amacıyla 10, 50 ve 100 düğümden oluşan farklı aday tesis yerleşim sayısı, atık tipi, atık işleme teknolojisi ve maksimum açılabilir tesis

sayıları ile Intel CORE i5-4200U 1,6 Ghz işlemci ile GAMS 148 CPLEX 10.2.0 yazılımı kullanılarak 36 adet test problemine ait elde edilen çözümler Çizelge 3.5'te belirtilmektedir. Örnek olarak 10 düğümden oluşan test probleminin GAMS/CPLEX kodu EK-3'te, çözümü EK-4'te sunulmaktadır.

Modelin doğrulanması amacıyla, 10, 50 ve 100 düğümden oluşan ağ yapıları kullanılarak oluşturulan 36 farklı test probleminin 10'ar kez çözülerek elde edilen ortalama sonuçlarına göre, tesis yerleşim yerleri sayısı ve atık tipi sayısının artması çözüm süresini uzatmaktadır.

Geliştirilen model, test problemlerinde, 50 düğüme kadar, en düşük maliyet ve en yüksek kazançla, belirlenmiş aday yerleşim yerlerine tesisleri yerleştirmekte; tehlikeli atıkların, hangi atık tesislere gönderileceğini belirlemektedir. Ancak, 100 düğümden oluşan problemlerin çözümü için 10 saatten fazla süreye ihtiyaç bulunmaktadır.

Çizelge 3.5. Test problemlerinin çözüm sonuçları

Yerleşim Yeri Sayısı (Atık Üretim Merkezi)	Aday Tesis Yerleşim Yeri sayısı	Atık Tipi Sayısı	Atık İşleme Tekn. Sayısı	Her Tesis Tipi için Maksimum Açılabilir Tesis Sayısı	Ort. Çözüm süresi (sn.) (10 Tekrar)	Gap (%)
10	2	4	3	3	1,643	0
10	2	4	2	3	1,235	0
10	2	3	3	3	1,373	0
10	2	3	2	3	1,140	0
10	5	4	3	3	3,601	0
10	5	4	2	3	1,977	0
10	5	3	3	3	2,477	0
10	5	3	2	3	2,019	0
10	8	4	3	3	4,737	0
10	8	4	2	3	2,645	0
10	8	3	3	3	2,883	0
10	8	3	2	3	2,770	0
50	10	4	3	5	189,097	0
50	10	4	2	5	509,723	0
50	10	3	3	5	300,939	0
50	10	3	2	5	297,233	0
50	25	4	3	5	2 566,136	0
50	25	4	2	5	5 939,441	0
50	25	3	3	5	7 465,604	0
50	25	3	2	5	3 099,743	0
50	40	4	3	5	9 031,621	0
50	40	4	2	5	8 953,552	0
50	40	3	3	5	17 176,372	0
50	40	3	2	5	6336,902	0
100	20	4	3	10	36 000	2,08
100	20	4	2	10	36 000	1,24
100	20	3	3	10	6 095,12	0
100	20	3	2	10	28393,55	0
100	50	4	3	10	36 000	7,31
100	50	4	2	10	36 000	6,22
100	50	3	3	10	36 000	4,31
100	50	3	2	10	36 000	7,65
100	80	4	3	10	36 000	9,93
100	80	4	2	10	36 000	6,57
100	80	3	3	10	36 000	6,13
100	80	3	2	10	36 000	7,88

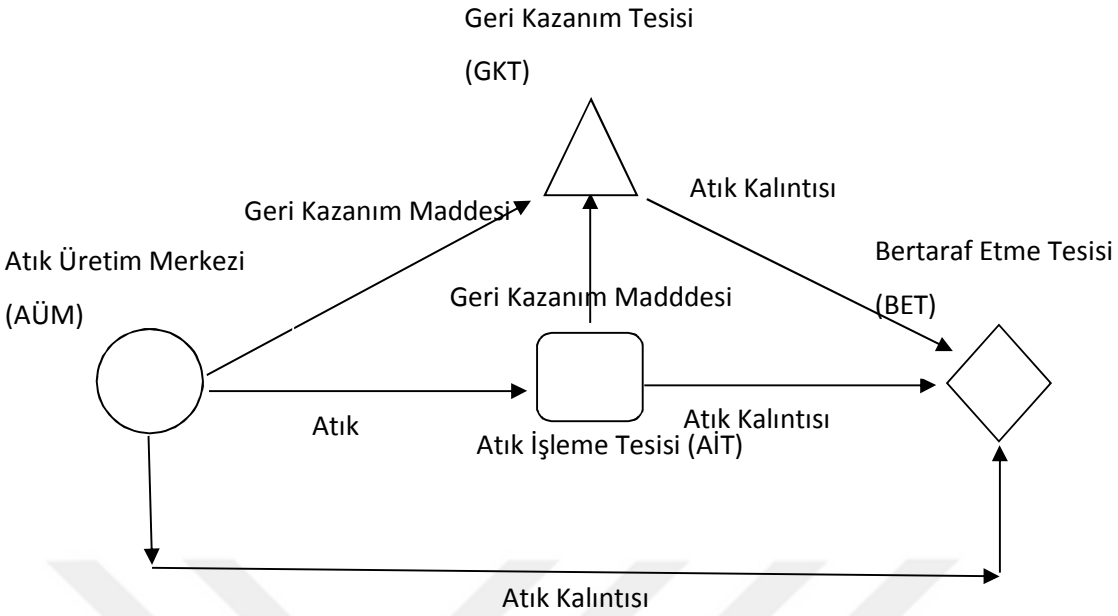
4. TEHLİKELİ ATIK YÖNETİMİ MODELİNİN MARMARA BÖLGESİNE UYGULANMASI

Bu bölümde, geliştirilen tehlikeli atık yönetimi modelinin, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığının ilgili birimlerinden ve bu birimlerin içerik düzenlemelerini yaptığı internet sayfalarından; Google Earth internet sayfasından; tehlikeli atık işleyen, geri kazandıran ve bertaraf eden tesislerin internet sayfalarından elde edilen gerçek veriler doğrultusunda Türkiye'nin Marmara bölgesinde uygulaması yapılmaktadır.

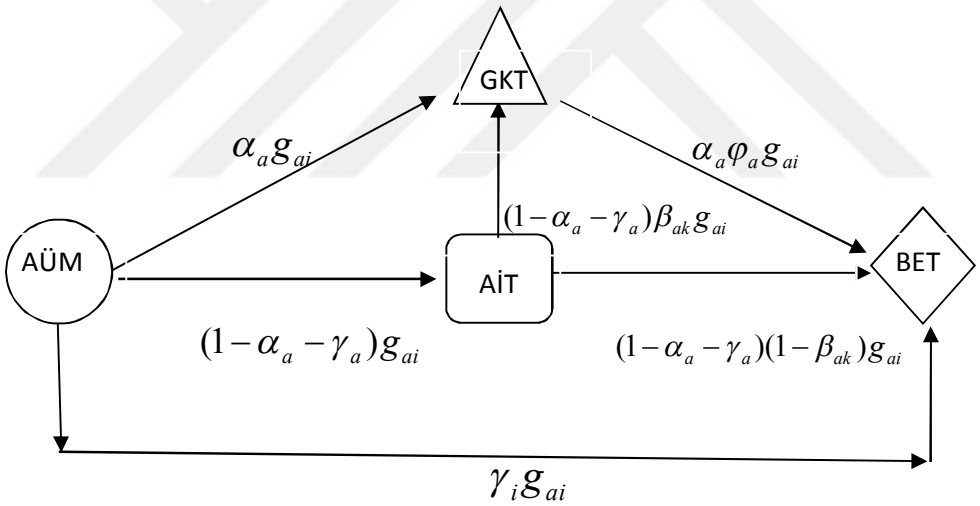
4.1. Model

Türkiye'de uygulanan sisteme göre revize edilen modelde, tehlikeli atık üretim merkezleri, tutuşabilir, reaksiyona girebilir, aşındırabilir ve toksik her türlü sanayi atığı üreten tesis, enerji üretim tesisleri veya evsel atık üreten yerleşim yerleri olabilmektedir. Tehlikeli atık üretim merkezlerinde üretilen atıkların geri kazanılabilir olanları geri kazanım tesislerine, bertaraf edilmesi gerekenler bertaraf etme tesislerine, diğerleri ise işlenmek üzere tehlikeli atık işleme tesislerine gönderilmektedir. Tehlikeli atık işleme tesislerinde, atık tipine uygun atık işleme teknolojisi ile işlem gören atıklardan geri kazanılabilir olanlar geri kazanım tesislerine, diğerleri bertaraf edilebilir uygun forma getirilmesi sonrasında atık kalıntısı olarak bertaraf etme tesislerine gönderilmektedir. Yakma esnasında elde edilen enerji kazanımı maliyet düşürücü bir gelir olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde, atık geri kazanım tesislerinde geri dönüştürülen maddelerden kazanç elde edilmekte; atık kalıntıları ise bertaraf etme tesislerinde bertaraf edilmektedir. Sistemin işleyişi, sistem içinde taşınan atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı oranları/miktarları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

Model, tek amaçlı olarak oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu, atık işleme, bertaraf etme ve geri kazanım tesisleri sabit maliyetleri ile atıkların tesisler arasında taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesini; geri kazanımla elde edilen kazancın ve atık işleme tesislerinde elde edilen enerji kazanım değerinin en büyüklenmesini içermektedir. Literatürde genellikle amaçlar içerisinde ele alınan tesis yerleşim ve ulaştırma riskleri bu çalışmada kısıtlar olarak modele dâhil edilmektedir.



Şekil 4.1. Marmara Bölgesi tehlikeli atık yönetimi modeli akışı



Şekil 4.2. Marmara Bölgesi tehlikeli atık yönetimi modeli uygulama probleminde, atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı akışı

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca hazırlanan Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzunda kurulacak tesislerin insan nüfus alanlarından en az 1 000 m uzaklıkta olması gerektiği belirtilmektedir [63]. Bu esas kabul edilerek, sabit tesisler için istenmeyen etki değeri tesis sınırlarının 1 000 m dâhilinde yer alan nüfus bilgisinden faydalanarak elde edilmektedir. Modelde, istenmeyen etkinin hesaplanmasında, tesis yerleşiminde esas alınan 1 000 m den uzak olma gerekliliği kuralı temel alınarak, taşıma için yol güzergâhının 1000 m sağ ve solunda yer alan yerleşim birimlerinin nüfusları ve taşınan tehlikeli atık miktarı değerlendirilmektedir. Sabit tesis istenmeyen etki

eşik değeri ve ulaştırma yolu istenmeyen etkisi eşik değerleri, daha önce test problemlerinde kullanılan kapasiteleri dikkate alan hesaplama yöntemi ile belirlenmektedir.

Riskin toplumun bütün kesimlerine dengeli dağıtımını ifade eden denge, Giannikos tarafından, tesisin kapasitesi ile artan, yerleşim yerlerine uzaklığı ile azalan bir fonksiyon olarak ifade edilen bireysel olumsuz etkinin azaltılması olarak kullanılmaktadır [31]. Modelde denge, Giannikos'un fonksiyonundan faydalanarak geliştirilen, tesisin 1 000 m. civarında ikamet eden nüfus ve tesiste işlenen atık/geri dönüşüm maddesi/ atık kalıntısı miktarı ile doğru orantılı, tesisin yerleşim yerlerine olan mesafesi ile ters orantılı bir fonksiyonun her tesis tipi için uyarlanarak kısıtlara eklenmesi suretiyle yansıtılmaktadır. Her tesis tipi için istenmeyen etkilere yönelik eşik değerler, kapasite ve tesislerin yerleşim yerlerine olan kuş uçuşu mesafeleri dikkate alınarak belirlenmektedir.

Modelde, tehlikeli atıkların taşındığı ulaştırma ağı $N = \{V, A\}$ ile tanımlanmaktadır. Bu ağın düğümleri, yerleşim merkezleri, atık işleme tesisleri, atık bertaraf etme tesisleri ve geri kazanım tesisleri için aday yerleşim yerleridir.

Varsayımlar

Atık üretim merkezlerinde farklı türde atıklar üretilmektedir.

Hâlihazırda mevcut kurulu atık işleme, bertaraf etme ve geri kazanım tesisleri bulunmaktadır. İhtiyaca göre, önceden belirlenmiş aday yerleşim yerlerine yeni tesisler kurulabilmektedir.

Atık işleme tesisleri, geri kazanım tesisleri ve bertaraf etme tesisleri için farklı teknolojilerin seçimi söz konusudur.

Tehlikeli atıkların, atık artıklarının ve geri kazanım maddelerinin birim taşıma maliyetleri bilinmektedir.

Atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinin birim değişken maliyetleri bilinmektedir.

Aynı tip tesislerin aynı kapasitede; aynı kurulum ve değişken maliyetlere sahip olduğu varsayılmaktadır. Kapasiteler için Life Hawaman Projesi ve Gaziantep Sanayi Odası tarafından 2012 yılında hazırlanan ön fizibilite raporu verileri; enerji kazanımı birim kazanç değeri için AKÇANSA ve İZAYDAŞ'ın verileri; geri kazanım kazancı için atık yağ geri kazanım kazancı esas alınmaktadır [64-69].

Tesis kurulum maliyetleri olarak Life Hawaman projesi verileri ve internetten elde edilen veriler esas alınmaktadır. Maliyetler yıllık alınmaktadır. Bu nedenle, yıllık amortisman değerleri tesis ömrü boyunca yıllık tesis kurulum maliyeti kabul edilmektedir [70-72].

Atık işleme ve bertaraf etme tesislerinden enerji kazanımı; geri kazanım tesislerinden ise malzeme geri kazanımı nedeniyle kazanç elde edilmektedir. Bu tesislerden elde edilen birim kazanç bilinmektedir ve bütün benzer tip tesisler için aynı değerler alınmaktadır.

Tüm tehlikeli atık tipleri tek tip araç ve aynı maliyet ile taşınmaktadır. Taşıma maliyeti, taşıma uzaklığına ve taşınan maddenin miktarına bağlıdır.

Geri kazanım maddeleri, tehlikeli atık üretim merkezlerinden ya da atık işleme tesislerinden elde edilebilmektedir.

Tehlikeli atık üretim merkezinden elde edilen tehlikeli atıklardan işlem yapılmadan geri kazanılan ve bertaraf edilmesi gereken tehlikeli madde oranı bilinmektedir ve atık tipine bağlıdır.

Atık işleme tesislerindeki geri kazanım ve bertaraf edilmesi gereken madde oranı bilinmektedir ve atık tipine bağlıdır.

Geri kazanım tesislerindeki geri kazanılan madde ve bertaraf etme tesislerine gönderilen kalıntı oranları bilinmektedir.

Matematiksel modelde kullanılan, indisler, parametreler ve karar değişkenleri aşağıda verilmektedir.

Kümeler

$N = (V, A)$ ulaştırma şebekesi,

G, atık üretim merkezleri, $G \subseteq V$,

T, aday atık işleme tesis yerleri, $T \subset V$,

TA , mevcut aday atık işleme tesisleri, $TA \subset T$,

D, aday bertaraf etme tesis yerleri, $D \subset V$,

DA , mevcut aday atık işleme tesisleri, $DA \subset D$,

R, aday geri kazanım tesis yerleri, $R \subset V$,

RA , mevcut aday atık işleme tesisleri, $RA \subset R$,

$K = \{k_1,...,k\}$, atık işleme teknolojileri,

$B = \{b_1,...,b\}$, bertaraf etme teknolojileri,

$E = \{e_1,...,e\}$, geri kazanım teknolojileri,

$Z = \{a_1,...,a\}$,tehlikeli atık tipleri,

L , nüfus yerleşim yerleri, $L \subseteq V$.

Parametreler

ca_{ij} $(i, j) \in A$, $i \in G, j \in T$ hattında bir birim tehlikeli atığı taşıma maliyeti,

cb_{ij} $(i, j) \in A$, $i \in G, j \in R$ hattında bir birim geri kazanım maddesi taşıma maliyeti,

cg_{ij} $(i, j) \in A$, $i \in G, j \in D$ hattında bir birim bertaraf edilecek tehlikeli atığı taşıma maliyeti,

cd_{ij} $(i, j) \in A$ $i \in T$, $j \in D$ hattında bir birim tehlikeli atık taşıma maliyeti,

cr_{ij} $(i, j) \in A$ $i \in T$, $j \in R$ hattında bir birim geri kazanım maddesi taşıma maliyeti,

cs_{ij} $(i, j) \in A$ $i \in R$, $j \in D$ hattında bir birim atık kalıntısı taşıma maliyeti,

dst_{ij} $(i, j) \in A$ $i \in G$, $j \in V$ arasındaki kuş uçumu mesafe,

vct_{ki} $i \in T$ yerleşim yerinde $k \in K$ atık işleme teknolojisine sahip atık işleme tesisinin değişken maliyeti (tesis işletim maliyeti),

vcr_i $i \in R$ yerleşim yerinde bulunan geri kazanım tesisinin değişken maliyeti (tesis işletim maliyeti),

vcd_i $i \in D$ yerleşim yerinde bulunan geri kazanım tesisinin değişken maliyeti (tesis işletim maliyeti),

ft_{ki} $i \in T$ yerleşim yerinde $k \in K$ atık işleme teknolojisine sahip bir tesisin açılması için sabit maliyet,

fd_{bi} $i \in D$ yerleşim yerinde $b \in B$ teknolojisine sahip bertaraf etme tesisinin açılması için sabit maliyet,

fr_{ei} $i \in R$ yerleşim yerinde $e \in E$ geri kazanım tesisinin açılması için sabit maliyet,

g_{ai} $i \in G$ yerleşim yerinde bulunan tehlikeli atık üretim merkezinde ortaya çıkan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

α_a $i \in G$ yerleşim yerinde bulunan tehlikeli atık üretim merkezinde ortaya çıkan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık için geri kazanım oranı,

γ_a $i \in G$ yerleşim yerinde bulunan tehlikeli atık üretim merkezinde ortaya çıkan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık için bertaraf edilmek üzere ortaya çıkan atık oranı,

φ_{ai} $i \in R$ yerleşim yerinde bulunan tehlikeli atık geri kazanım merkezinde ortaya çıkan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık için atık kalıntısı oranı,

β_{ak} $k \in K$ atık işleme teknolojisi ile işlem gören $a \in Z$ tipi tehlikeli atık için geri kazanım oranı,

A_{aib} $a \in Z$ tehlikeli atık tipinin $i \in D$, atık bertaraf etme tesisinde $b \in Z$ atık işleme teknolojisi ile işlenmesinden elde edilen enerji kazanımının birim değeri,

MM_{ai} $a \in Z$ tehlikeli atık tipinin $i \in R$ düğümünde geri kazanımı ile elde edilen kazancın birim değeri,

ut_{ki} $k \in K$ atık işleme teknolojisine sahip $i \in T$ düğümünde bulunan atık işleme tesisinin kapasitesi,

ur_{ei} $e \in E$ teknolojisine sahip $i \in R$ geri kazanım tesisinin kapasitesi,

ud_{bi} $b \in B$ teknolojisine sahip $i \in D$ bertaraf etme tesisinin kapasitesi,

$ComT_{ak}$ $a \in Z$ tipi tehlikeli atık $k \in K$ atık işleme teknolojisi ile uyumlu ise 1; diğer durumlarda 0'dır,

$comR_{ae}$ $a \in Z$ tipi tehlikeli atık $e \in E$ atık geri kazanım teknolojisi ile uyumlu ise 1; diğer durumlarda 0'dır,

$comD_{ab}$ $a \in Z$ tipi tehlikeli atık $b \in B$ atık bertaraf etme teknolojisi ile uyumlu ise 1; diğer durumlarda 0'dır,

lot_{ki} $i \in T$ tesis yerleşim yerinde $k \in K$, atık işleme teknolojisi içeren atık işleme tesisinin kurulması için tesise gelmesi gereken minimum tehlikeli atık miktarı,

lor_{ei} $i \in T$ tesis yerleşim yerinde $e \in E$, atık geri kazanım teknolojisi içeren tehlikeli atık geri kazanım tesisinin kurulması için tesise gelmesi gereken minimum geri kazanım maddesi miktarı,

lod_{bi} $i \in D$ yerleşim yerinde $b \in B$ atık bertaraf etme teknolojisi içeren tehlikeli atık bertaraf etme tesisi kurulabilmesi için gereken minimum tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

ψt_{aijl} (i, j) hattında $a \in Z$ tipi tehlikeli atık taşınması nedeniyle $l \in L$ yerleşim yerinde etkilenmesi olası insan nüfusu,

ψr_{aijl} (i, j) hattında $a \in Z$ tipi geri dönüşüm malzemesi taşınması nedeniyle $l \in L$ yerleşim yerinde etkilenmesi olası insan nüfusu,

ψd_{aijl} (i, j) hattında taşınan atık kalıntısı taşınması nedeniyle yerleşim yerinde $l \in L$,

$POPt_i$ $i \in T$ tesis yerleşim yerine atık işleme tesisi kurulması nedeniyle yerleşim yerlerinde etkilenmesi olası insan nüfusu,

$PO\,\mathrm{Pr}_i$ $i \in R$ tesis yerleşim yerine atık geri kazanım tesisi kurulması nedeniyle yerleşim yerlerinde etkilenmesi olası insan nüfusu,

$POPd_i$ $i \in D$ tesis yerleşim yerine atık bertaraf etme tesisi kurulması nedeniyle yerleşim yerlerinde etkilenmesi olası insan nüfusu,

ωt atık işleme tesisleri denge eşik değeri,

ωr geri kazanım tesisleri denge eşik değeri,

ωd bertaraf etme tesisleri denge eşik değeri

τt atık işleme tesislerine tehlikeli atık taşınması nedeniyle güzergâh boyunca yerleşim yerlerinin maruz kaldığı istenmeyen etki eşik değeri,

τr geri kazanım tesislerine geri kazanım maddesi taşınması nedeniyle güzergâh boyunca yerleşim yerlerinin maruz kaldığı istenmeyen etki eşik değeri,

τd bertaraf etme tesislerine tehlikeli atık kalıntısı taşınması nedeniyle güzergâh boyunca yerleşim yerlerinin maruz kaldığı istenmeyen etki eşik değeri,

tt Açılması istenilen maksimum atık işleme tesisi sayısı,

vv Açılması istenilen maksimum geri kazanım tesisi sayısı,

nn Açılması istenilen maksimum atık bertaraf etme tesisi sayısı,

<u>*Karar değişkenleri*</u>

x_{aij} (i, j) hattında taşınan $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

yra_{ij} Atık işleme tesislerinden gelen geri kazanım maddelerinin geri dönüşüm tesisinden $(i, j) \in A, i \in R, j \in D$ hattında taşınan tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

yrb_{ij} Atık üretim tesislerinden gelen geri kazanım maddelerinin geri dönüşüm tesisinden $(i, j) \in A, i \in R, j \in D$ hattında taşınan tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

yt_{aij} Atık işleme tesislerinden hattında taşınan tehlikeli $a \in Z$ tipi atık kalıntısı miktarı,

mg_{aij} $(i, j) \in A, i \in G, j \in R$ hattında taşınan $a \in Z$ tipi geri kazanılacak atık miktarı,

mt_{aij} $(i, j) \in A, i \in T, j \in R$ hattında taşınan $a \in Z$ tipi geri kazanılacak atık miktarı,

<u>*Değişkenler*</u>

θ_{aki} $i \in T$ düğümünde k teknolojisi ile işleme tabi tutulacak $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

dt_{abi} Atık işleme tesisinde oluşan $a \in Z$ tipi atığın $b \in B$ teknolojisi ile $i \in D$ düğümünde bertaraf edilecek tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

dra_{abi} Atık işleme tesislerinden gelen geri kazanım maddelerinin, geri kazanım tesisinde oluşan $a \in Z$ tipi atığın $b \in B$ teknolojisi ile $i \in D$ düğümünde bertaraf edilecek tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

drb_{abi} Atık üretim merkezlerinden gelen geri kazanım maddelerinin, geri kazanım tesisinde oluşan $a \in Z$ tipi atığın $b \in B$ teknolojisi ile $i \in D$ düğümünde bertaraf edilecek tehlikeli atık kalıntısı miktarı,

δr_{aei} Atık üretim merkezlerinden gelen $i \in R$ tipi atığın $e \in E$ teknolojisi ile geri kazanım işlemi gören $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

δt_{aei} Atık işleme tesislerinden gelen $i \in R$ tipi atığın $e \in E$ teknolojisi ile geri kazanım işlemi gören $a \in Z$ tipi tehlikeli atık miktarı,

f_{ki} $i \in T$ düğümüne, k atık işleme teknolojisi bulunan bir atık işleme tesisi yerleştirilmişse 1, diğer durumlarda 0 değeri alan 0-1 değişkeni,

n_{bi} $i \in D$ düğümüne, b atık bertaraf etme teknolojisi bulunan bir atık bertaraf etme tesisi yerleştirilmişse 1, diğer durumlarda 0 değeri alan 0-1 değişkeni,

v_{ei} $i \in R$ düğümüne, e atık geri kazanım teknolojisi bulunan bir geri kazanım tesisi yerleştirilmişse 1, diğer durumlarda 0 değeri alan 0-1 değişkeni,

<u>*Matematiksel model*</u>

Min TM

$$\sum_i \sum_k ft_{ki} f_{ki} + \sum_i \sum_b fd_{bi} n_{bi} + \sum_i \sum_e fr_{ei} v_{ei} + \sum_{(i,j)\in A} \sum_a ca_{ij} x_{aij}$$
$$+ \sum_{(i,j)\in A} \sum_a cb_{ij} mg_{aij} + \sum_{(i,j)\in A} \sum_a cd_{ij} yt_{aij} + \sum_{(i,j)\in A} \sum_a cr_{ij} mt_{aij} + \sum_{(i,j)\in A} \sum_a cg_{ij} yg_{aij}$$
$$+ \sum_{(i,j)\in A} \sum_a cs_{ij} yg_{aij} + \sum_{(i,j)\in A} \sum_a cs_{ij} yrb_{aij} + \sum_i \sum_a \sum_k vct_{ki} \theta_{aik} + \sum_i \sum_a \sum_e vcr_{ei} \delta r_{aei}$$
$$+ \sum_i \sum_a \sum_e vcr_{ei} \delta t_{aei} + \sum_i \sum_a \sum_b vcd_{bi} dt_{abi} + \sum_i \sum_a \sum_b vcd_{bi} dr_{abi} - \sum_i \sum_a \sum_b A_{aib} dt_{abi}$$
$$- \sum_a \sum_i \sum_b A_{aib} dg_{abi} - \sum_i \sum_a \sum_e M_{aei} \delta t_{aei} - \sum_i \sum_a \sum_e M_{aei} \delta r_{aei} \qquad (4.1)$$

<u>*Kısıtlar*</u>

Atık üretim merkezlerinden atık işleme tesislerine atık akışı kısıtı,

$$(1-\alpha_a-\gamma_a) g_{ai} - \sum_k \theta_{aki} = \sum_{j:(i,j)\in A} x_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} x_{aji} \; ; \qquad a \in Z \; , \; i \in V \qquad (4.2)$$

Atık üretim merkezlerinden atık bertaraf etme tesislerine atık kalıntısı akışı kısıtı,

$$\gamma_a g_{ai} - \sum_b dg_{abi} = \sum_{j:(i,j)\in A} yg_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} yg_{aji} \; ; \quad a \in Z \; , \; i \in V \qquad (4.3)$$

Atık üretim merkezlerinden atık geri kazanım tesislerine geri kazanım maddesi akışı kısıtı,

$$\alpha_a g_{ai} - \sum_e \delta r_{aei} = \sum_{j:(i,j)\in A} mg_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} mg_{aji} \; ; \; a \in Z \; , \; i \in V \tag{4.4}$$

Atık işleme tesislerinden atık geri kazanım tesislerine geri kazanım maddesi akışı kısıtı,

$$(1-\alpha_a-\gamma_a) g_{ai} \beta_{ak} - \sum_e \delta t_{aei} = \sum_{j:(i,j)\in A} mt_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} mt_{aji} \; ; \quad a \in Z \; , \; i \in V \tag{4.5}$$

Atık işleme tesislerinden bertaraf etme tesislerine atık kalıntısı akışı kısıtı,

$$(1-\alpha_a-\gamma_a) g_{ai} (1-\beta_{ak}) - \sum_b dt_{abi} = \sum_{j:(i,j)\in A} yt_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} yt_{aji} \; ; \; a \in Z \; , \; i \in V \; , \tag{4.6}$$

Atık işleme tesislerinden atık geri kazanım tesislerine gelen geri kazanım maddelerinden, yapılan işlem sonrası bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı akışı kısıtı,

$$(1-\alpha_a-\gamma_a) \beta_{ak} \varphi_a - \sum_b dra_{abi} = \sum_{j:(i,j)\in A} yra_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} yra_{aji} \; ; \quad a \in Z \; , i \in V \tag{4.7}$$

Atık üretim merkezlerinden atık geri kazanım tesislerine gelen geri kazanım maddelerinden, yapılan işlem sonrası bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı akışı kısıtı,

$$\alpha_a g_{ai} \varphi_a - \sum_b drb_{abi} = \sum_{j:(i,j)\in A} yrb_{aij} - \sum_{j:(j,i)\in A} yrb_{aji} \; ; \qquad a \in Z \; , \; i \in V \tag{4.8}$$

Kapasite kısıtları,

$$\sum_a \theta_{aki} \le ut_{ki} f_{ki} \; ; \qquad k \in K \; , \; i \in T \tag{4.9}$$

$$\sum_a dg_{abi} + \sum_a dt_{abi} + \sum_a dra_{abi} + \sum_a drb_{abi} \le ud_{bi} n_{bi} \; ; \; b \in B \, , i \in D \tag{4.10}$$

$$\sum_a \delta r_{aei} + \sum_a \delta t_{aei} \le ur_{ei} v_{ei} \; ; \qquad e \in E \; , \; i \in R \tag{4.11}$$

Teknoloji uyumluluğu kısıtları,

$$\theta_{aki} \le ut_{ki} ComT_{aki} f_{ki} \; ; \quad a \in Z \; , \; k \in K \; , \; i \in T \tag{4.12}$$

$$\delta t_{aei} + \delta r_{aei} \le ur_{ei} ComR_{aei} n_{bi} \; ; \quad a \in Z \; , \; e \in E \; , \; i \in R \tag{4.13}$$

$$dg_{abi} + dt_{abi} + dra_{abi} + drb_{abi} \le ud_{bi} ComD_{abi} v_{ei} \; ; \; a \in Z \, , b \in B \, , i \in D \tag{4.14}$$

Mevcut tesisler kısıtları,

$$f_{ki} = 1 ; \; k \in K \; , \; i \in T \tag{4.15}$$

$$n_{bi} = 1 ; \; b \in B \, , \; i \in D \tag{4.16}$$

$$v_{ei} = 1 ; \quad e \in E \; , \; i \in R \tag{4.17}$$

Aday tesis yerleri dışında tesis açılmaması kısıtları,

$$\sum_a \sum_k \theta_{aki} = 0 ; \qquad i \in (V - T) \tag{4.18}$$

$$\sum_a \sum_b dt_{abi} = 0; \qquad i \in (V - D) \tag{4.19}$$

$$\sum_a \sum_b dra_{abi} = 0; \qquad i \in (V - D) \tag{4.20}$$

$$\sum_a \sum_b drb_{abi} = 0; \qquad i \in (V - D) \tag{4.21}$$

$$\sum_a \sum_e \delta t_{aei} = 0; \quad i \in (V - R) \tag{4.22}$$

$$\sum_a \sum_e \delta r_{aei} = 0; \quad i \in (V - R) \tag{4.23}$$

Açılmasına izin verilen maksimum tesis sayısı kısıtları,

$$\sum_i \sum_k f_{ki} \le tt; \tag{4.24}$$

$$\sum_i \sum_e v_{ei} \le vv; \tag{4.25}$$

$$\sum_i \sum_b n_{bi} \le nn; \tag{4.26}$$

Tesislerin belirli miktar atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı talebi olmadan açılamayacağını belirten kısıtlar,

$$\sum_a \theta_{aki} \ge lot_{ki} f_{ki}; \qquad k \in K,\ i \in T \tag{4.27}$$

$$\sum_a dt_{abi} + \sum_a dra_{abi} + \sum_a drb_{abi} \ge lod_{bi} n_{bi}; \quad b \in B,\ i \in D \tag{4.28}$$

$$\sum_a \delta r_{aei} + \sum_a \delta_{aei} \ge lor_{ei} v_{ei}; \qquad e \in E,\ i \in R \tag{4.29}$$

Ulaştırma istenmeyen etkisi kısıtları,

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi t_{ij} x_{aij} \le \tau t, \qquad a \in Z \tag{4.30}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi r_{ij} mt_{aij} \le \tau r, \quad a \in Z \tag{4.31}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi r_{ij} mg_{aij} \le \tau r, \quad a \in Z \tag{4.32}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi d_{ij} yt_{aij} \le \tau d, \quad a \in Z, \tag{4.33}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_a \psi d_{ij} yr_{aij} \le \tau d, \quad a \in Z, \tag{4.34}$$

Denge Kısıtları

$$\sum_i \sum_a \sum_k \frac{POPt_i \theta_{aki}}{dst_{ij}} \le \omega t, \quad j \in V \tag{4.35}$$

$$\sum_i \sum_a \sum_e \frac{PO\,\mathrm{Pr}_i(\delta r_{aei} + \delta t_{aei})}{dst_{ij}} \le \omega r\ , \qquad j \in V \tag{4.36}$$

$$\sum_i \sum_a \sum_b \frac{POPd_i(dt_{abi} + dra_{abi} + drb_{abi})}{dst_{ij}} \le \omega d\ , \qquad j \in V \tag{4.37}$$

0-1 değişkenlerle ilgili kısıtlar,

$$f_{ki} \in \{0,1\},\ k \in K,\ i \in T \tag{4.38}$$

$$fd_{bi} \in \{0,1\},\ b \in B,\ i \in D \tag{4.39}$$

$$fr_{ei} \in \{0,1\},\ e \in E,\ i \in R \tag{4.40}$$

İşaret kısıtları,

$$\theta_{aki} \ge 0\ ,\ a \in Z,\ k \in K,\ i \in T \tag{4.41}$$

$$x_{aij}, yt_{aij}, yra_{aij}, yrb_{aij}, mt_{aij}, mg_{aij} \ge 0, \quad a \in Z,\ (i,j) \in A \tag{4.42}$$

$$dt_{abi} \ge 0;\ a \in Z,\ b \in B,\ i \in D \tag{4.43}$$

$$dra_{abi} \ge 0;\ a \in Z,\ b \in B,\ i \in D \tag{4.44}$$

$$drb_{abi} \ge 0;\ a \in Z,\ b \in B,\ i \in D \tag{4.45}$$

$$\delta r_{aei}, \delta t_{aei} \ge 0;\ a \in Z,\ e \in E,\ i \in R \tag{4.46}$$

Modelde amaç fonksiyonu Eş. 4.1, arıtma tesisi, geri kazanım tesisi ve bertaraf etme tesislerinin tesis kurulum maliyetleri, tesis değişken maliyetleri ve tehlikeli atıkların tesisler arasında taşıma maliyetleri toplamını en küçüklemekte; atık bertaraf etme tesislerinde elde edilen enerji kazanımı ve geri kazanım tesislerinde elde edilen geri kazanımı en büyüklemektedir.

Eş. 4.2 - Eş. 4.8 arasındaki kısıtlar akış denge kısıtlarıdır.

Eş. 4.9 - Eş. 4.11 arasındaki kısıtlar tesis kapasite kısıtlarıdır.

Eş. 4.12 - Eş. 4.14 arasındaki kısıtlar, atıklar, geri kazanım maddeleri ve bertaraf edilecek atık ve atık kalıntılarının tesis teknolojileri ile uyumluluğu kısıtlarıdır.

Eş. 4.15 - Eş. 4.17 arasındaki kısıtlar, mevcut kurulu tesisleri ifade eden kısıtlardır.

Eş. 4.18 - Eş. 4.23 arasındaki kısıtlar, ilgili tesisler dışında işlem yapılmamasını sağlayan kısıtlardır.

Eş. 4.24 - Eş. 4.26 arasındaki kısıtlar, açılmasına izin verilen maksimum tesis sayısı kısıtlarıdır.

Eş. 4.27 - Eş. 4.29 arasındaki kısıtlar, tesislerin belirli miktar atık, geri kazanım maddesi ve atık kalıntısı talebi olmadan açılamayacağını belirten kısıtlardır.
Eş. 4.30 - Eş. 4.34 arasındaki kısıtlar, ulaştırma risk (istenmeyen etki) kısıtlarıdır.
Eş. 4.35 - Eş. 4.37 arasındaki kısıtlar, denge kısıtlarıdır.
Eş. 4.38 - Eş. 4.40 arasındaki kısıtlar, 0-1 değişkenleri belirten kısıtlardır.
Eş. 4.41 - Eş. 4.46 arasındaki kısıtlar, işaret (0 veya pozitif olma) kısıtlarıdır.

4.2. Veriler

Atık Yönetimi Yönetmeliğinde atık kodları ile tanımlanmış 394 adet tehlikeli atık bulunmaktadır [4]. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2014 yılı için toplam tehlikeli atık miktarı 1 413 220 ton olarak belirtilmiştir. 2014 yılında en çok beyanı gerçekleştirilen ilk on atık kodu ve miktarı Çizelge 4.1 de verilmektedir. Atık kodu bazında en yüksek beyan gerçekleştirilen ilk on atık miktarı toplamı 926 550 ton olarak tespit edilmiştir. Bu miktar, 2014 yılında beyan edilen toplam atık miktarının %66'sını oluşturmaktadır [73]. Bu nedenle, tehlikeli atık yönetim modelinin Marmara bölgesi için yapılan uygulamada, Marmara bölgesinde üretilen en yüksek beyan gerçekleştirilen ilk on atık tipi dikkate alınmaktadır. Marmara bölgesinde beyan edilen atıkların iller bazında miktarı ve hangi atık işlem tipine tabi tutulduğu verisi, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığından temin edilmiştir [70]. Elde edilen veriler EK -5, Çizelge 5.1'dadır.

Tehlikeli atıkların bertaraf ve geri kazanım işlemleri Atık Yönetimi Yönetmeliğinin EK-2/A'da yer almaktadır. Buna göre 15 adet bertaraf yöntemi (D1-D15) ve 13 adet geri kazanım yöntemi (R1-R13) bulunmaktadır. EK-6'da bu yöntemler belirtilmektedir [4]. Marmara bölgesi atık tipleri ve bu atıkların tabi tutulduğu atık işleme, geri dönüşüm ve bertaraf işlemleri incelendiğinde, söz konusu atıkların atık tipi bazında tamamının:
Atık işleme tesislerinde: R12 ve D9,
Atık geri kazanım tesislerinde: R1, R4 ve R5,
Atık bertaraf etme tesislerinde: D5 ve D10 yöntemlerinden en az biri ile işlem gördüğü görülmektedir. Bu nedenle, uygulamada sadece yukarıda belirtilen yedi yöntem dikkate alınmaktadır.

Çizelge 4.1. Atık kodu bazında en yüksek beyan gerçekleştirilen ilk 10 atık [73]

Sıra No	Atık Kodu	Atık Kodu Tanımı	Miktarı (ton)
1	100207	Tehlikeli maddeler içeren gazların arıtımı sonucu ortaya çıkan katı atıklar	385 430
2	150110	Tehlikeli maddelerin kalıntılarını içeren ya da tehlikeli maddelerle kontamine olmuş ambalajlar	87 044
3	170503	Tehlikeli maddeler içeren toprak ve kayalar	85 805
4	180103	Enfeksiyonu önlemek amacı ile toplanmaları ve bertarafı özel işleme tabi olan atıklar	76 761
5	110105	Sıyırma asitleri (parlatma asitleri)	73 162
6	120120	Tehlikeli maddeler içeren öğütme parçaları ve öğütme maddeleri	68 453
7	190813	Endüstriyel atık suyun diğer yöntemlerle arıtılmasından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar	46 484
8	150202	Tehlikeli maddelerle kirlenmiş emiciler, filtre malzemeleri (başka şekilde tanımlanmamış ise yağ filtreleri), temizleme bezleri, koruyucu giysiler	40 946
9	040219	Saha içi atık su arıtımından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar	31 795
10	050103	Tank dibi çamurları	30 670

Aynı kaynakta, her tesisin atık kodu bazında işlem yapmasına bakanlıkça izin verildiği belirtilmektedir. Böylece, her atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesisinin hangi atığa hangi teknoloji ile işlem yapabileceği verisi elde edilebilmektedir. Tesislerin T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığından aldığı izin belgesi gereğince her atık tipinin atık kodu bazında hangi teknoloji ile işlem göreceği bilgisi yasal izinle belirlenmiş olması nedeniyle atık-atık uyumluluğu kısıtına ihtiyaç kalmamaktadır. Bu nedenle modelden çıkarılmıştır. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığının internet sitesinden elde edilen bu işletmelerin isimleri, adresleri, hangi tipte bir işletme olduğu ve hangi işlemlerin yapıldığını özetleyen tablo EK-7'de bulunan Çizelge 7.1'de sunulmaktadır.

Marmara bölgesinde 11 il ve 146 ilçe olmak üzere 157 yerleşim yeri bulunmaktadır. Uygulamada, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca atık üretimi verileri il bazında kayıt altına alınması nedeniyle uygulamada, iller ve mevcut atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesislerinin bulunduğu ilçeler ile aday yerleşim yerlerinin bulunduğu toplam 44 yerleşim yeri dikkate alınmaktadır. Yerleşim yerlerinde kurulu tesislerin her yerleşim yeri

için toplam kapasiteleri dikkate alınmaktadır. Kurulu tesis bulunan yerleşim yerleri, Balıkesir, Bandırma, Bilecik, Bursa, Nilüfer, Osmangazi, İnegöl, Gemlik, Orhangazi, Kestel, Çanakkale, Ezine, Biga, Edirne, Lalapaşa, Başakşehir, Esenyurt, Tuzla, Bağcılar, Küçükçekmece, Pendik, Silivri, Arnavutköy, Kırklareli, Pınarhisar, Vize, Lüleburgaz, Kocaeli, İzmit, Başiskele, Derince, Darıca, Körfez, Çayırova, Dilovası, Gebze, Sakarya, Erenler, Tekirdağ, Çerkezköy, Ergene, Çorlu, Kapaklı, Yalova'dır. Halen Marmara bölgesinde teknoloji bazında mevcut kurulu tesisler Çizelge 4.2'de; aday tesis yerleşim yerleri ise Çizelge 4.3'te belirtilmektedir.

Gaziantep Sanayi Odası tarafından 2012 yılında hazırlanan ön fizibilite raporunda Türkiye genelinde bulunan tesis sayıları ve bunların toplam atık işleme teknolojileri bazında kapasiteleri belirtilmiştir [64]. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 2014 yılı tehlikeli atık istatistiklerinde, Tehlikeli Atık Beyan Sistemi (TABS)'nde 2011 yılı ile 2014 yılı arasında sisteme giriş yaparak atık beyanında bulunan tesislerin beyan ettikleri toplam atık miktarı 938 498 tondan 1 423 220 tona (484 722 ton tehlikeli atık artışı) çıkmıştır [73]. Sisteme girişi yapılan atık miktarında 0,5 kat artış olduğu görülmektedir. Uygulamada, direkt bir ilişki olmasa da tesislerin kapasitelerinin ortalamalarının da 0,5 kat arttığı kabul edilerek, R1, R4, R5, D9 ve R12 teknolojilerini içeren tesis kapasitelerinde ortalama tesis kapasitelerinin 1,5 katı esas alınmaktadır.

Bu durumda, D9 ile R12'nin kapasitelerinin aynı olduğu ve yine 1,5 katı olduğu varsayılmaktadır. Buna göre, raporda, R1 için tesis başına 22 933 043 kg (527 460 000 kg/ 23 tesis =22 933 043,47 kg); R4 için tesis başına 6 673 058 kg (113 442 000 kg/17 tesis = 6 673 058,823), R5 için 488 750 kg (1 955 000 kg/4 tesis = 488 750 kg) R12 ve D9 için tesis başına 3 487 857 kg (24 415 000kg/7 tesis = 3 487 857,14) alınmaktadır. 1,5 katları esas alındığında, R1 için 34 399 564 kg, R4 için 10 009 587 kg, R5 için 733 125 kg, R12 ve D9 için 5 231 785 kg olduğu kabul edilmektedir. D10 için İZAYDAŞ'ın yakma kapasitesi 35 000 000 kg ve D5 için İZAYDAŞ'ın tehlikeli atık depolama kapasitesi 25 000 000 kg (2015 yılı için gerçekleşen toplam 22 356 000 kg) alınmaktadır [64, 65].

Çizelge 4.2. Mevcut tesisler

Sıra No	Tesis Yerleşim Yeri	Atık İşleme Tesisi	Geri Kazanım. Tesisi	Atık Bertaraf Etme Tesisi
1	Balıkesir	R12, D9	R4, R1	D10
2	Bandırma			
3	Bilecik	R12	R4, R1	
4	Bursa	R12	R4, R1	
5	Nilüfer	R12	R4, R1	
6	Osmangazi	R12	R4, R1	
7	İnegöl	R12	R4, R1	
8	Gemlik	R12	R1	
9	Orhangazi			
10	Kestel			D5, D10
11	Çanakkale	D9		
12	Ezine			D10
13	Biga	R12		
14	Edirne			
15	Lalapaşa			D5
16	Başakşehir			
17	Esenyurt	R12	R1	
18	Tuzla	R12	R4, R1	
19	Bağcılar		R4	
20	Küçükçekmece			
21	Pendik		R4, R1	
22	Silivri		R4	
23	Arnavutköy		R4	
24	Kırklareli		R4	
25	Pınarhisar			
26	Vize			D10
27	Lüleburgaz	D9		
28	Kocaeli	R12	R4, R1	
29	İzmit	D9		D5, D10
30	Başiskele		R4, R1	
31	Derince			
32	Darıca			D5, D10
33	Körfez			D5, D10
34	Çayırova	R12	R1	
35	Dilovası		R1	
36	Gebze			
37	Sakarya	R12, D9	R4, R1	
38	Erenler	R12		
39	Tekirdağ	D9		
40	Çerkezköy	R12	R4	
41	Ergene	R12	R4	
42	Çorlu	R12	R5, R4, R1	D5, D10
43	Kapaklı		R4	
44	Yalova	R12	R1	
Mevcut Tesisler		18 R12, 6 D9	1 R5, 19 R4, 17 R1	6 D5, 8 D10
Toplam		24 Tesis	37 Tesis	14 Tesis

Çizelge 4.3. Aday tesis yerleri

Sıra No	Tesis Yerleşim Yeri	Atık İşleme Tesisi	Geri Kazanım. Tesisi	Atık Bertaraf Etme Tesisi
1	Balıkesir			
2	Bandırma			
3	Bilecik			
4	Bursa			
5	Nilüfer			X
6	Osmangazi			X
7	İnegöl			X
8	Gemlik			
9	Orhangazi			X
10	Kestel		X	
11	Çanakkale			
12	Ezine			
13	Biga		X	
14	Edirne	X	X	X
15	Lalapaşa		X	
16	Başakşehir	X	X	
17	Esenyurt			
18	Tuzla			X
19	Bağcılar	X		X
20	Küçükçekmece	X	X	X
21	Pendik	X		X
22	Silivri	X		X
23	Arnavutköy	X		X
24	Kırklareli	X		X
25	Pınarhisar	X	X	X
26	Vize	X	X	
27	Lüleburgaz		X	X
28	Kocaeli			X
29	İzmit		X	
30	Başiskele	X		X
31	Derince	X	X	X
32	Darıca	X	X	
33	Körfez	X	X	
34	Çayırova			X
35	Dilovası	X		X
36	Gebze	X	X	X
37	Sakarya			X
38	Erenler		X	X
39	Tekirdağ		X	X
40	Çerkezköy			X
41	Ergene			X
42	Çorlu			
43	Kapaklı	X		X
44	Yalova			X
Toplam		17	16	27

Enerji kazancı hesaplamalarında, AKÇANSA Çimento fabrikaları ve İZAYDAŞ verileri kullanılmaktadır [65, 67]. Buna göre, AKÇANSA'nın 2015 yılı için atıklardan elde edilen ikincil yakıt miktarı, 69.000 ton/yıl; 2016 yılı ilk beş ayı için enerji kazanımı, 31 237 604 kwh olarak gerçekleşmektedir [66, 67]. Dolayısıyla, orantı ile 12 ay için bu değerin 74 970 249 kwh olduğu ve bu atık miktarının 35 000 ton/yıl kadarının tehlikeli atık olduğu varsayılarak, kg başına elde edilen enerjinin yaklaşık olarak 0,5'i (0,493) tehlikeli atıklardan edilmektedir. Buna göre, 1 kg atıktan 1,087 (74 970 249 kwh: 69 000 000 kg = 1,087 kwh/kg) kwh elektrik enerjisi üretilmekte ve bunun 0,5'i olan 0,544 kwh elektrik enerjisi tehlikeli atıktan elde edilmektedir. Benzer şekilde, İZAYDAŞ'ın 30 232 000 kg endüstriyel atığın yakılmasıyla 16 010 500 kwh elektrik üretilmektedir [65]. Dolayısıyla, 1 kg atıktan 0,530 kwh elektrik üretilmektedir. Her tesisin kg atık başına ürettiği elektrik miktarının çok yakın değerler olduğu görülmektedir. Hesaplamalarda, iki değerin ortalaması olan 0,537 kwh/kg değeri kullanılmaktadır. 1 kwh elektrik, 20.09.2016 itibarıyla 0,362395 TL ve 1 ABD Doları, 2,98 TL olmak üzere, 1 kwh elektrik 1,08 ABD Doları, 1kg tehlikeli atıktan elde edilen kazanç ise 0,537 kwh için 0,580 ABD Doları olmaktadır [68, 75].

Geri kazanım kazancı hesaplamasında, R1 yöntemi ile işlem sınıfına giren atık yağ geri kazanımında, 1 kg atık yağdan elde edilen kazanç 0.3 ABD Doları olarak alınmaktadır [75, 76].

Bir tehlikeli atık yakma tesisinin kurulum maliyeti 55 740 000 ABD Doları (50 milyon Avro), 15 yıllık ömür dikkate alındığında yıllık amortisman değeri 3 716 000 ABD Doları; atık düzenli depolama tesisi kurulum maliyeti 52 395 600 ABD Dolarıdır (47 milyon Avro). 20 yıllık ömür dikkate alındığında (Toplam kapasite 500 000 ton, yıllık kapasite 25 000 ton olmak üzere) yıllık amortisman değeri 2 619 780 ABD Doları; atık işleme tesisi için kurulum maliyeti 18 394 200 ABD Doları (16 500 000 Avro), 20 yıllık ömür dikkate alındığında yıllık amortisman değeri 919 710 ABD Dolarıdır [69, 70, 71]. Bir kullanılmış lastik geri dönüşüm tesisinin kurulum maliyeti ise 2 100 000 ABD Doları, 20 yıllık ömür dikkate alındığında yıllık amortisman değeri 105 000 ABD Dolarıdır [71,72]. Problemde yer alan hesaplamalarda tesis kurulum maliyetleri olarak, tesis kurulum maliyetlerinin yıllık bazda değeri olarak amortisman değerleri alınmaktadır. Buna göre, R12 veya D9 teknolojilerini içeren bir atık işleme tesisi için 919 710 ABD Doları; R1, R4 veya R5 teknolojilerini içeren bir geri kazanım tesisi için 105 000 ABD Doları; D5 yöntemi ilen

bertaraf eden bir tesis için 2 619 780 ABD Doları ve D10 teknolojisi içeren bir bertaraf etme tesisi için 3 716 000 ABD Doları esas alınmaktadır.

Değişken maliyetlerle ilgili olarak, tehlikeli atıkların birim yakma maliyeti 0,3344 ABD Doları/kg, birim düzenli depolama maliyeti 0,07803 ABD Doları /kg, geri kazanım maliyeti 0.9385 ABD Doları/kg ve atık işleme maliyeti 0,1672 ABD Doları/kg olarak alınmaktadır [70, 69, 76].

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığından elde edilen, E7-5 Çizelge 5.1'de sunulan 2014 yılına ait veriler içinden 10 atık tipine ilişkin veriler üzerinde yapılan çalışmadan elde edilen, atık üretim merkezlerinden geri dönüşüm tesislerine gönderilen geri dönüşüm maddesi ve atık bertaraf etme tesislerine gönderilen tehlikeli atık kalıntısı oranları Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te; tesis teknolojilerinin atık tipleri ile uyumluluğu Çizelge 4.8 – 4.10'te belirtilmektedir. 2014 yılı Tehlikeli Atık İstatistikleri bülteninden elde edilen bilgi doğrultusunda, atık işleme tesislerinden geri kazanım tesislerine gönderilen geri dönüşüm maddeleri oranları Çizelge 4.6'te gösterilmektedir [73]. Atık işleme tesislerinden atık bertaraf etme tesislerine gönderilen atık kalıntısı oranlarının elde edilen verilerde bulunmaması nedeniyle, Alumur ve Kara'nın ve Samanlıoğlu'nun çalışmalarında [5,33] kullandıkları 0,05 oranı kullanılmaktadır. Tehlikeli atık geri kazanım tesislerinden bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı oranları Çizelge 4.7'da belirtilmektedir.

Çizelge 4.4. Tehlikeli atık üretim merkezlerinden geri kazanıma giden atık oranları

Sıra No	Atık No	Geri Kazanım Oranı
1	100207	1
2	150110	0,044
3	170503	0
4	180103	0,0037
5	110105	1
6	120120	0,58
7	190813	0,139
8	150202	0,286
9	040219	0,00057
10	050103	0,40

Atık taşıması yapılan karayollarında tehlikeli atık taşıma istenmeyen etki kısıtlarının eşik değerleri ile denge kısıtları eşik değerleri bölüm 3'te modeli doğrulamak için üzerinde çalışılan test problemlerinde kullanılan eşik belirleme formülasyonu kullanılarak elde edilmektedir. Buna göre,

nt, toplam tehlikeli atık işleme tesislerine taşınan tehlikeli atığın yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, taşınan atığın yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Uygulama probleminde $nt = 0{,}01$ alınmaktadır.

$$\tau t = nt \sum_{(i,j)\in A} \psi t_{ij}(1-\alpha_a-\gamma_a)g(a,i),\ a \in Z$$

Çizelge 4.5. Tehlikeli atık üretim merkezlerinden bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı oranları

Sıra No	Atık No	Atık Kalıntısı Oranı
1	100207	0
2	150110	0,022
3	170503	0,776
4	180103	0,044
5	110105	0
6	120120	0,0002
7	190813	0,034
8	150202	0,045
9	040219	0,0086
10	050103	0,020

Çizelge 4.6. Tehlikeli atık işleme tesislerinden geri kazanım tesislerine giden geri kazanım maddesi oranları

Sıra No	Atık No	Geri Kazanım Oranı
1	100207	0
2	150110	0,7314
3	170503	0
4	180103	0,7314
5	110105	0
6	120120	0,7314
7	190813	0,7314
8	150202	0,7314
9	040219	0,7314
10	050103	0,7314

Çizelge 4.7. Tehlikeli atık geri kazanım tesislerinden bertaraf etme tesislerine giden atık kalıntısı oranları

Sıra No	Atık No	Atık Kalıntısı Oranı
1	100207	0
2	150110	0,05
3	170503	0
4	180103	0,05
5	110105	0
6	120120	0,05
7	190813	0,05
8	150202	0,05
9	040219	0,05
10	050103	0,05

Çizelge 4.8. Tehlikeli atık işleme tesisleri teknolojilerinin atık tipleri ile uyumluluğu

Sıra No	Atık No	Atık İşleme Teknolojisi Uyumluluğu	
		R12	D9
1	100207	Uyumsuz	Uyumsuz
2	150110	Uyumlu	Uyumsuz
3	170503	Uyumlu	Uyumsuz
4	180103	Uyumlu	Uyumlu
5	110105	Uyumsuz	Uyumsuz
6	120120	Uyumlu	Uyumsuz
7	190813	Uyumlu	Uyumsuz
8	150202	Uyumlu	Uyumsuz
9	040219	Uyumlu	Uyumsuz
10	050103	Uyumlu	Uyumsuz

Çizelge 4.9.Tehlikeli atık geri kazanım tesisleri teknolojilerinin atık tipleri ile uyumluluğu

Sıra No	Atık No	Atık İşleme Teknolojisi Uyumluluğu		
		R1	R4	R5
1	100207	Uyumsuz	Uyumlu	Uyumsuz
2	150110	Uyumlu	Uyumlu	Uyumsuz
3	170503	Uyumsuz	Uyumsuz	Uyumsuz
4	180103	Uyumsuz	Uyumsuz	Uyumlu
5	110105	Uyumsuz	Uyumsuz	Uyumlu
6	120120	Uyumsuz	Uyumlu	Uyumsuz
7	190813	Uyumlu	Uyumlu	Uyumsuz
8	150202	Uyumlu	Uyumlu	Uyumsuz
9	040219	Uyumlu	Uyumsuz	Uyumsuz
10	050103	Uyumlu	Uyumsuz	Uyumsuz

Çizelge 4.10. Tehlikeli atık bertaraf etme tesisleri teknolojilerinin atık tipleri ile uyumluluğu

Sıra No	Atık No	Atık İşleme Teknolojisi Uyumluluğu	
		D10	D5
1	100207	Uyumsuz	Uyumsuz
2	150110	Uyumlu	Uyumlu
3	170503	Uyumlu	Uyumlu
4	180103	Uyumlu	Uyumsuz
5	110105	Uyumsuz	Uyumsuz
6	120120	Uyumlu	Uyumlu
7	190813	Uyumlu	Uyumlu
8	150202	Uyumlu	Uyumlu
9	040219	Uyumsuz	Uyumlu
10	050103	Uyumlu	Uyumsuz

nr , toplam tehlikeli atık geri kazanım tesislerine taşınan tehlikeli atığın yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, taşınan atığın yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Uygulama probleminde $nr = 0{,}1$ alınmaktadır.

$$\tau r = nr \sum_{(i,j)} \psi r_{ij} (\alpha_a g_{ai} + (1 - \alpha_a - \gamma_a) g_{ai} \beta_{ak}), \quad a \in Z, k \in K$$

nd , toplam tehlikeli atık bertaraf etme tesislerine taşınan tehlikeli atık kalıntısının yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, taşınan atık kalıntısının yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Uygulama probleminde $nd = 0{,}01$ alınmaktadır.

$$\tau d = nd \sum_{(i,j) \in A} \psi d_{ij} ((1 - \alpha_a - \gamma_a) g_{ai} - (1 - \beta_{ak}) + \alpha_a g_{ai} \varphi_a + \gamma_a g_{ai}), \; a \in Z, \; k \in K$$

Toplumsal tepki ve faydayı sağlamayı amaçlayan ve denge kısıtı olarak da ifade edebileceğimiz tehlikeli atık işleyen tesislerin istenmeyen etkilerinin eşik değerleri şu şekilde hesaplanmaktadır.

pt_i, bütün tehlikeli atık işleme tesislerinin yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, atık işleme tesisinin istenmeyen etkisinin eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde $pt_i = 1000$ alınmaktadır. $POPt_i, PO\Pr_i, POPd_i$ tesis dış sınırlarının 1000 m dışında bulunan bölgede istenmeyen etkiye maruz kalan nüfusun bütün tesis tipleri için aynı olduğu kabul edilerek EK-8, Çizelge 8.1'de yer alan nüfus değerleri dikkate alınmaktadır.

$$\omega t = pt_i \sum_a \sum_i POPt_i (1 - \alpha_a - \gamma_a) g_{ai},$$

pr_i, bütün geri dönüşüm tesislerinin yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, geri dönüşüm tesisinin istenmeyen etkisi veya bir başka ifadeyle denge eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde pr_i, 1000 alınmaktadır.

$$\omega r = pr_i \sum_a \sum_k \sum_i PO\Pr_i (\alpha_a g_{ai} + (1 - \alpha_a - \gamma_a) \beta_{ak} g_{ai},$$

pd_i, bütün atık bertaraf tesislerinin yerleşim yerlerine istenmeyen etkisinin oranı olmak üzere, bertaraf etme tesisi istenmeyen etkisi veya denge eşik değeri aşağıdaki şekilde elde edilmektedir. Test problemlerinde pd_i, 1000 000 alınmaktadır.

$$\omega d = pd_i \sum_a \sum_k \sum_i POPd_i ((1 - \alpha_a - \gamma_a) \beta_{ak} g_{ai} + \alpha_a \varphi_a g_{ai} + \gamma_a g_{ai}),$$

Tesis yerleşim yerleri arasındaki yol mesafeleri ve kuş uçumu mesafeler ArcGIS yazılımı kullanılarak elde edilmiştir (EK- 9, Çizelge 9.1 ve Çizelge 9.2).

4.3. Uygulama Sonuçları

Marmara bölgesi, endüstriyel tesislerin ve nüfusun en yoğun olduğu bölgelerden biridir. Uygulama için gerekli en temel veriyi oluşturan tehlikeli atık tipi bazında tehlikeli atık üretim miktarları, bu atıklara hangi işlemlerin yapıldığı verisi (EK-5, Çizelge 5.1) ve

Marmara bölgesinde halen mevcut bulunan tehlikeli atıklara işlem yapan tesislerle ilgili veri T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığından temin edilmiştir (EK-7, Çizelge 7.1).

Tehlikeli atık yönetim modelinin Marmara bölgesi verileriyle yapılan uygulaması öncelikle elde bulunan verilerle, sonrasında ise elde edilemeyen tehlikeli atık işleyen tesislerin maksimum sayısı ve tesis kurulması için gerekli minimum atık miktarının belirli değerler varsayılarak uygulandığı iki senaryo grubu ile değerlendirilmektedir.

Maksimum tesis sayısı, hükümetlerin veya yerel yönetimlerin bir kararı olabilmekle beraber, tesislerin açılması için gerekli minimum tehlikeli atık miktarı hem yönetimsel hem de kurulacak tesislerin maliyet-etkin olmalarıyla ilgili olmaktadır. İlk problemde, açılmasına izin verilen maksimum tesis sayısı ve tesis açılması için gereken minimum tehlikeli atık miktarına ilişkin bir veri olmaması nedeniyle her iki kısıt modele dâhil edilmeden problem çözülmektedir (Eş. 4.24-4.29). Modelin Marmara Bölgesi ile ilgili elde edilen veriler doğrultusunda oluşturulan uygulama problemi, Intel Core i5-4200U 1,6 GHZ işlemci ile GAMS 148 CPLEX 10.2.0 yazılımı kullanılarak 25 dk. 37,844 sn.de en iyi çözüm değeri ile çözülmüş olup 295 220 771,52 ABD Dolarıdır. Uygulamanın GAMS/CPLEX kodu EK-10'da, çözümü EK-11'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.11'de Marmara bölgesinde bulunan yerleşim yerlerinde yeni açılan tesisler ve bunların teknolojilerini belirten sonuçlar özetlenmektedir. Buna göre, mevcut 18 adet R12, 6 adet D9 teknolojileri içeren atık işleme tesislerine ilave 3 adet R12 teknolojisi içeren yeni tesis açılmakta; mevcut 1 adet R5, 19 adet R4 ve 18 adet R1 teknolojileri içeren atık geri dönüşüm tesislerine 22 adet R5, 3 adet R1 ve 7 R4 teknolojileri içeren yeni tesis açılmakta; mevcut 6 adet D5 ve 8 adet D10 teknolojileri içeren atık bertaraf etme tesislerine ilave 2 D5 ve 1 D10 teknolojileri içeren tesis açılmaktadır (Mevcut tesisler için Bkz. Çizelge 4.2).

Toplam açılan tesis sayısı dikkate alındığında, en fazla yeni tesis kurulumu ihtiyacı geri kazanım tesislerindedir. Geri kazanım tesisleri içinde ise, mevcut 1 adet R5 teknolojisine sahip tesis olmasına karşılık 22 adet R5 teknolojisine sahip yeni tesis kurulumu ihtiyacı olması dikkat çekicidir (Bkz. Çizelge 4.11).

Çizelge 4.12'de denge/ulaştırma istenmeyen etkilerinin eşik değeri değerlerinde artış durumunda sonuçlar özetlenmektedir. Denge/ulaştırma istenmeyen etkilerinin eşik değeri

değerlerinde %10 ve %20 artış durumunda eşik değer artışının maliyeti azaltıcı bir etki yaptığı; tesis sayısını artırdığı ve tesislerin yerleşim yerlerinin bir kısmını değiştirdiği görülmektedir.

Maksimum tesis ve minimum atık miktarı kısıtlarının olması durumunda modelin nasıl sonuç vereceğini değerlendirebilmek amacıyla açılabilecek maksimum tesis sayıları, tehlikeli atık işleme tesisleri için 45, 35 ve 30 adet, tehlikeli atık geri kazanım tesisleri için 85, 75 ve 65 adet, tehlikeli atık bertaraf etme tesisleri için 30, 20 ve 18 adet; tesislerin açılabilmesi için tesislere gelmesi gereken minimum tehlikeli madde miktarı, bütün tesis tipleri için 10 000 kg ve 11 000 kg alınmakta ve sonuçları farklı eşik değerleri ile Çizelge 4.13'de özetlenmektedir. Probleme maksimum tesis sayısı ve minimum atık miktarı kısıtları eklenerek yapılan çözümlerde, maksimum tesis sayısı arttığında açılan tesis sayısının belirlenen kısıtlamayla sınırlı kaldığı, maliyete azaltıcı bir etki yaptığı; tesis açılması için gerekli minimum tehlikeli atık miktarı arttıkça tesis sayısının azaldığı ve maliyetin arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.11. Çözüm sonucunda yeni açılan tesisler

Sıra No	Tesis Yerleşim Yeri	Atık İşleme Tesisi	Geri Kazanım Tesisi	Atık Bertaraf Etme Tesisi
1	Balıkesir		R5	
2	Bandırma			
3	Bilecik			
4	Bursa		R5	
5	Nilüfer			D5
6	Osmangazi			
7	İnegöl			
8	Gemlik			
9	Orhangazi			
10	Kestel			
11	Çanakkale			
12	Ezine		R4	
13	Biga		R4	
14	Edirne		R1	
15	Lalapaşa			
16	Başakşehir		R5	
17	Esenyurt		R5	
18	Tuzla		R5	
19	Bağcılar		R5	
20	Küçükçekmece		R5	
21	Pendik		R5	
22	Silivri			
23	Arnavutköy		R5	
24	Kırklareli		R5, R1	
25	Pınarhisar			
26	Vize			
27	Lüleburgaz			
28	Kocaeli		R5	
29	İzmit		R5	
30	Başiskele		R5	
31	Derince		R5	
32	Darıca		R5, R4	
33	Körfez	R12	R5, R4	
34	Çayırova		R5, R4	
35	Dilovası	R12	R5, R4	D5, D10
36	Gebze	R12	R5,R4	
37	Sakarya		R5	
38	Erenler		R5	
39	Tekirdağ		R4, R1	
40	Çerkezköy			
41	Ergene			

Çizelge 4.11. (devam) Çözüm sonucunda yeni açılan tesisler

Sıra No	Tesis Yerleşim Yeri	Atık İşleme Tesisi	Geri Kazanım Tesisi	Atık Bertaraf Etme Tesisi
42	Çorlu			
43	Kapaklı			
44	Yalova		R5	
Yeni Açılan Tesisler		3 R12	22 R5, 3 R1, 8 R4	2 D5, 1 D10
Toplam		3 Tesis	33 Tesis	3 Tesis

Çizelge 4.12. Denge ve ulaştırma istenmeyen etkisi kısıtları ile senaryolar ve sonuçları

SN	DA	UİE	MTS	ATS	TTS	AFD ($)	İlk AFD ile Fark ($)	Fark %
1	+%0	+%0	GKT:37 BET:14 AİT:24 Toplam: 75	GKT:33 BET:3 AİT:3 Toplam: 39	GKT:70 BET:17 AİT:27 Toplam: 114	295 220 771,52	0	%0
2	+%10	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Toplam:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Toplam: 40	GKT:70 BET:17 AİT:28 Toplam: 115	294 520 154,90	700616,62	%0,24
3	+%10	+%0	GKT:37 BET:14 AİT:24 Toplam: 75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Toplam: 40	GKT:70 BET:17 AİT:28 TOP: 115	295 077 989,71	142781,81	%0,05
4	+%0	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Toplam:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Toplam: 40	GKT:70 BET:17 AİT:28 TOP: 115	294 667 366,46	553 405,06	%0,19
5	+%20	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Toplam:75	GKT:31 BET:3 AİT:4 Toplam: 38	GKT:68 BET:17 AİT:28 Toplam: 113	294 150 452,36	1 070 319,20	%0,36
6	+%20	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Toplam:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Toplam: 40	GKT:70 BET:17 AİT:28 Toplam: 115	294 458 335,20	762 436,32	%0,26
7	+%10	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Toplam:75	GKT:32 BET:3 AİT:4 Toplam: 39	GKT:69 BET:17 AİT:28 Toplam: 114	294 150 452,36	1 070 319,20	%0,36
8	+%30	+%30	GKT:37 BET:14 AİT:24 Toplam:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Toplam: 40	GKT:70 BET:17 AİT:28 Toplam: 115	293 951 350,28	1 269 421,20	%0,43

S N: Senaryo numarası; DA: Denge alt sınır değişimi; UİE: Ulaştırma İstenmeyen etkisi alt sınır değişimi; MTS: Mevcut tesis sayısı; ATS: Yeni açılan tesis sayısı; TTS: Toplam tesis sayısı; AFD: Amaç fonksiyonu değeri

Çizelge 4.13. Tesis sayısı üst sınırı, atık miktarı alt sınırı, denge ve ulaştırma istenmeyen etkisi kısıtları ile senaryolar ve sonuçları

SN	AMTS			EDAM	UİE	DA	TESİSLER			İlk AFD İle Fark ($)	Fark %
	AİT	GKT	BET				MTS	ATS	TTS		
9	45	85	30	10000	+%0	+%0	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Top:40	GKT:70 BET:17 AİT:28 Top:115	-18 728,83	-%0,06
10	45	85	30	10000	+%10	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Top.:40	GKT70 BET:17 AİT:28 Top.:115	681 892,81	%0,23
11	45	85	30	10000	+%10	+%0	GKT:37 BET:14 AİT:24 TOP: 75	GKT:34 BET:3 AİT:4 TOP: 41	GKT:71 BET:17 AİT:28 TOP: 116	82 124,52	%0,03
12	45	85	30	10000	+%0	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Top.:40	GKT:70 BET:17 AİT:28 Top.:115	534 681,27	%0,18
13	45	85	30	10000	+%20	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:32 BET:3 AİT:4 Top.: 39	GKT:69 BET:17 AİT:28 Top.: 114	794 932,79	%0,27
14	45	85	30	10000	+%10	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Top.: 40	GKT:70 BET:17 AİT::28 Top.: 115	749 126,45	%0,25
15	45	85	30	10000	+%20	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Top.: 40	GKT:70 BET:17 AİT:28 Top.: 115	1 051 599,8	%0,36
16	35	75	20	10000	+%0	+%0	GKT:37 GKT:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 GKT:5 AİT:4 Top.: 42	GKT:70 GKT:19 AİT:28 Top.: 117	-18 728,83	-%0,06
17	35	75	20	10000	+%10	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:5 AİT:4 TOP: 42	GKT:70 BET:19 AİT:28 TOP: 117	681 892,81	%0,23

AMTS: Açılmasına izin verilen maksimum tesis sayısı; EDAM: Tesis açılabilmesi için gerekli en düşük atık miktarı; UİE: Ulaştırma İstenmeyen etkisi alt sınır değişimi; DA: Denge alt sınır değişimi; MTS: Mevcut tesis sayısı; ATS: Yeni açılan tesis sayısı; TTS: Toplam tesis sayısı; AFD: Amaç fonksiyonu değeri

Çizelge 4.13. (devam) Tesis sayısı üst sınırı, atık miktarı alt sınırı, denge ve ulaştırma istenmeyen etkisi kısıtları ile senaryolar ve sonuçları

SN	AMTS			EDAM	UİE	DA	TESİSLER			İlk AFD İle Fark ($)	Fark %
	AİT	GKT	BET				MTS	ATS	TTS		
18	35	75	20	10000	+%20	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 Top.: 40	GKT:70 BET:17 AİT:28 Top.: 115	1 117 491,31	%0,38
19	35	75	20	11000	+%0	+%0	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:3 AİT:4 TOP: 40	GKT:70 BET:17 AİT:28 TOP: 115	-20 857,42	-%0,07
20	35	75	20	11000	+%10	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:33 BET:4 AİT:4 Top.: 41	GKT:70 BET:18 AİT:28 Top.: 116	-739 800,92	-%0,25
21	35	75	20	11000	+%20	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:32 BET:3 AİT:4 TOP: 39	GKT:69 BET:17 AİT:28 TOP: 114	1 115 904,11	%0,38
22	30	65	18	10000	+%0	+%0	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:28 BET:3 AİT:4 TOP: 35	GKT:65 BET:17 AİT:28 TOP: 110	-2 981 128,97	-%1
23	30	65	18	10000	+%10	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:28 BET:3 AİT:4 TOP: 35	GKT:65 BET:17 AİT:28 TOP: 110	-2 258 178,26	-%0,76
24	30	65	18	10000	+%20	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:28 BET:3 AİT:4 Top.: 35	GKT:65 BET:17 AİT:28 Top.: 110	-1 894 740,62	-%0,64
25	30	65	18	11000	+%0	+%0	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:28 BET:3 AİT:4 TOP: 35	GKT:65 BET:17 AİT:28 TOP: 110	-2 982 628,53	-%1
26	30	65	18	11000	+%10	+%10	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:28 BET:3 AİT:4 TOP: 35	GKT:65 BET:17 AİT:28 TOP: 110	-2 261 395,98	-%0,76
27	30	65	18	11000	+%20	+%20	GKT:37 BET:14 AİT:24 Top.:75	GKT:28 BET:3 AİT:4 Top.: 35	GKT:65 BET:17 AİT:28 Top.: 110	-1 805 344,34	-%0,61

AMTS: Açılmasına izin verilen maksimum tesis sayısı; EDAM: Tesis açılabilmesi için gerekli en düşük atık miktarı; UİE: Ulaştırma İstenmeyen etkisi alt sınır değişimi; DA: Denge alt sınır değişimi; MTS: Mevcut tesis sayısı; ATS: Yeni açılan tesis sayısı; TTS: Toplam tesis sayısı; AFD: Amaç fonksiyonu değeri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sürekli endüstriyel ve teknolojik gelişim ile nüfus yerleşim yerlerinin kalabalıklaşması, genişlemesi insan sağlığına ve yaşam alanlarına ciddi bir tehdit oluşturması nedeniyle tehlikeli atık yönetiminin önemi artmaktadır. Çevresel ve insanları doğrudan ilgilendiren şehirsel bir problem olmasının yanında; bu maddelerin toplanması, taşınması, ilgili tehlikeli atık tesislerinin tesis yerlerinin belirlenmesi, kurulması, bu tesislerde tehlikeli atıkların işlem görmesi topluma ciddi riskler ve maliyetler de yüklemektedir.

Zografos ve Samara ile başlayan ve çok farklı çalışmalarla günümüze kadar gelişen tehlikeli atık tesis yerleşimi ve rotalama modelleri bulunmaktadır [48]. Bu çalışmalarda geliştirilen modeller, tek veya çok ürünlü; maliyet, kazanç, risk, denge ve zaman ölçütleri; tehlikeli atık işleme tesisleri, tehlikeli atık geri kazanım tesisleri ve bertaraf etme tesisleri; tesislerin teknolojileri ile tehlikeli atıkların uyumlulukları; atıkların tesislerde işlem görebilmesi için birbirleri ile uyumlulukları; ulaştırma modları gibi içeriklerin sadece bazılarını içermektedir.

Tez ile geliştirilen tehlikeli atık yönetim modeli ve Marmara bölgesi uygulaması, tek amaçlı; çok ürünlü; maliyet, kazanç, tesis/taşıma istenmeyen etkisi, denge ölçütlerini içeren; tehlikeli atık işleme tesisi, geri kazanım tesisi ve bertaraf etme tesislerinin yerleşimi ve bunlar arasında tehlikeli atıkların taşınmasını kapsayan; tesis-tehlikeli atık uyumluluğu, atık-atık uyumluluğunu dikkate alan birleşik bir modeldir. Bu haliyle, tez ile geliştirilen tehlikeli atık yönetim modeli, günümüze kadar yapılan çalışmalar içinde kapsam bakımından en fazla içeriğe sahip modeldir.

Tehlikeli atık yönetim modelinin Marmara bölgesine ait elde edilen verilerle yapılan uygulamasıyla, bölgesel ihtiyaçlara cevap verebilecek stratejik seviyede karar vermeye yardımcı olabilecek bir model olduğu gösterilmektedir. Geliştirilen model ile karar vericiler seviyesinde, üretilen tehlikeli atık tipi ve miktarı göz önüne alınarak hangi tip tesislere ihtiyaç duyulduğu; bu tesislerin risk ve toplumsal tepkiyi belirlenen eşik değerler doğrultusunda en aza indirecek şekilde önceden belirlenen hangi aday yerleşim yerlerine yerleştirilebileceği hangi tesisler arasında ne kadar hangi tip tehlikeli atık taşınabileceği bilgileri edinilebilecek bu doğrultuda kaynakların doğru yönetilmesi sağlanabilecektir. Örneğin, elde ettiğimiz veriler doğrultusunda, Marmara bölgesinde T.C. Çevre ve

Şehircilik Bakanlığının lisans verdiği 1 adet R5 geri kazanım yöntemi ile işlem gören mevcut tesis bulunmaktadır. Ancak, üretilen tehlikeli atıkların miktarı dikkate alınarak ve tesis kapasitelerinin tez çalışmasında öngörülen kapasite kadar olduğu varsayımı ile R5 geri kazanım yöntemi ile işlem gören 22 adet yeni tesise ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Yani, hâlihazırda, 22 adet R5 geri kazanım teknolojisine sahip tesis ile işlem görmesi gereken çok miktarda tehlikeli atık işlem görememekte veya kayıt dışı tesislerde/kayıt dışı yöntemlerle işlem görmektedir.

Tehlikeli atık tesis yerleşim ve rotalama problemi NP-Zor sınıfında bir problemdir. Bu nedenle, problem boyutunun artması ve karmaşıklaşmasıyla birlikte çözümü de güçleşmektedir. Tez ile önerilen tehlikeli atık yönetim modelinde, problem boyutunu uygulanabilir ve çözülebilir bir seviyede tutabilmek amacıyla, modelin, tesis yerleşimi, tesis tipleri, teknolojiler-atık uyumluluğu, risk ve denge konularına ağırlık verilirken rotalama bölümü dikkate alınmamıştır. Böylece ilk modelde, 50 düğüme kadar optimum sonuçlar elde edilirken daha fazla düğüm içeren problemlerde çözüm için daha uzun süreye ihtiyaç bulunmaktadır. Daha sonra yapılacak çalışmalarda, daha fazla düğüm içeren, tehlikeli atık tipi sayısının çok daha fazla olduğu problemler için en iyi çözüme yakın sonuçlar üreten sezgisel çözüm yöntemlerinin kullanılması/geliştirilmesi önerilmektedir.

Geliştirilen modelde, risk ve denge kısıtlarında nüfus ve taşınan veya tesislerde işlem gören atık miktarları dikkate alınmaktadır. Gelecek çalışmalarda, risk değerlerinin elde edilmesinde, coğrafi faktörler ve bitki örtüsünü de içeren çevresel etkilerin kullanılabileceği modeller geliştirilebilir. Örneğin bölgesel olarak sürekli veya dönemsel oluşan rüzgârların etkisi modele dâhil edilebilir. Ayrıca, tehlikeli atıkların yakılması nedeniyle çevreye salınan gazların, ekonomik değeri olan bitki örtüsü ve tarımsal arazilere etkisi modele yansıtılabilir.

Tezde geliştirilen tehlikeli atık yönetim modelinde, tehlikeli atıkların sadece karayolu ile taşınması dikkate alınmaktadır. Farklı taşıma modları dâhil edilerek model geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Cappanera, P., Gallo, G., Maffioli, F. (2004). Discrete Facility Location and Routing of Obnoxious Activities. *Discrete Applied Mathematics*, 133, 3-28.

2. Emek, E. Kara, B.Y. (2007). Hazardous Waste Management Problem: The Case for Incineration. *Computers and Operations Research*, 1-18.

3. Barnhart, C. ve Laporte, G. (Editörler) (2007). *Handbook in OR and MS*, Boston: Elsevier B.V., 14, 539-621.

4. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015). *Atık Yönetimi Yönetmeliği*, Resmi Gazete Tarihi: 02.04.2015, Resmi Gazete Sayısı: 29314.

5. Alumur, S., Kara, B.Y. (2007). A new model for the hazardous waste location routing problem. *Computers and Operations Research*, 34, 1406-1423.

6. İnternet: Waste statistics. (2016). *Eurosat Statistics Explained*, URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fec.europa.eu%2Feurostat%2Fstatistics-explained%2Findex.php%2FWaste_statistics&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

7. Boffey, T.B., Mesa, J.A., Ortega, F.A. ve Rodrigues, J.I. (2008). Locating a Low Level Waste Disposal Site. *Computers and Operations Research*, 1-16.

8. Nema, A. K., Modak, P. M. (1998). A strategic design approach for optimization of regional hazardous waste management systems. *Waste Management and Research*, 16(3), 210-224.

9. Nema, A. K., Gupta, S. K. (1999). Optimization of regional hazardous waste management systems: An improved formulation. *Waste Management*, 19, 441-451.

10. Alidi, S.A. (1996). A Multiobjective Optimization Model fort the Waste Management of the Petrochemical Industry. *Applied Mathematical Modelling*, 20, 925-933.

11. Erkut, E., Karagiannidis, A., Perkoulidis, G., Tjandra, S. A. (2008). A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece. *European Journal of Operational Research*, 187, 1402-1421.

12. Cappenera, P. (2004). *Discrete Facility Location and Routing of Obnoxious Activities*, Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Milano, 1-4.

13. Erkut, E., Verter, V. (1998). Modeling of transport risk for hazardous materials. *INFORMS*, 46 (5), 625-642.

14. Fabiano, B., Curro, F., Palazzi, E., Pastorino, R. (2002). A framework for risk assesment and decision-making strategies in dangerous good transportation. *Journal of Hazardous Materials*, 93, 1-1.

15. Oggero, A., Darbra, R.M., Munoz M., Planas E., Casal, J. (2006). A survey of accidents occuring during the transport of hazardous substances by road and rail. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1-3), 1-7.

16. Yang, J., Li, F., Zhou, J., Zhang, L., Huang, L., Bi, J. (2010). A survey on hazardous materials accidents during road transport in China from 2000 to 2008. *Journal of Hazardous Materials,* 184, 647-653.

17. Batta, R., Chiu, S.S. (1988). Optimal Obnoxious paths on a network: Transportation of hazardous materials. *Operations Research,* 36(1), 84-92.

18. Alp, E., (1995). Risk-based transportation planning practice overall methodology and a case example. *INFOR*, 33(1), 4-19.

19. Zhang, J.J., Hodgson, J., Erkut, E. (2000). Using GIS to assess risks in hazardous materials transport in networks. *European Journal of Operations Research,* 121(2), 316-329.

20. US DOT. (1994). Guidelines for applying criteria to designate routes for transporting hazardous materials. Report FHWA-SA-94-083, US Department of Transportation. *Federal Highway Administration,* Washington DC.

21. Revelle, C., Cohon, J. ve Shobrys, D. (1991). Simultaneous siting and routing in the Disposal of Hazardous Wastes. *Transportation Science,* 25, 138-145.

22. Saccomanno, F., Chan, A. (1985). Economic evaluation of routing strategies for hazardous road shipments. *Transportation Research Record,* 1020, 12–18.

23. Abkowitz, M., Lepofsky, M., Cheng, P. (1992). Selecting criteria for designating hazardous materials highway routes. *Transportation Research Record,* 1333, 30–35.

24. Sivakumar, R.A., Batta, R., Karwan, M.H. (1993). A network-based model for transporting extremely hazardous materials. *Operations Research Letters,* 13 (2), 85–93.

25. Sivakumar, R.A., Batta, R., Karwan, M.H. (1995). A multiple route conditional risk model for transporting hazardous materials. *INFOR,* 33 (1), 20–33.

26. Sherali, H.D., Brizendine, L.D., Glickman, T.S., Subramanian, S. (1997). Low-probability highconsequence considerations in routing hazardous materials shipments. *Transportation Science,* 31, 237–251.

27. Erkut, E., Ingolfsson, A. (2000). Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning. *Transportation Science,* 34 (2), 165–179.

28. Sivakumar, R.A., Batta, R. (1994). The variance-constrained shortest path problem. *Transportation Science,* 28 (4), 309–316.

29. Erkut, E., Ingolfsson, A. (2005). Transport risk models for hazardous materials: Revisited. *Operations Research Letters,* 33 (1), 81–89.

30. Saat, M.R., Werth, C.J., Shaeffer, D., Hongkyu, Y., Barkan, C.P.L. (2014). Environmental Risk Analysis of Hazardous Material Rail Transportation. *Journal of Hazardous Materials,* 264, 560-569.

31. Gionnikos, I., (1998). A Multiobjective Programming Model for Locating Treatment Sites and Routing Hazardous Wastes. *European Journal of Operational Research,* 104, 333-120.

32. Kara, B. Y., Erkut, E., Verter, V. (2003). Accurate calculation of hazardous materials transport risks. *Operations Research Letters,* 31, 285-292.

33. Samanlıoğlu, F. (2013). A Multi-Objective Model for the Industrial Hazardous Waste Location-Routing Problem. *European Journal of Operational Research,* 226, 332-340.

34. Glickman, T.S., Erkut, E., Zschocke, M. S. (2007). The Cost and Risk Impacts of Rerouting Railroad Shipments of Hazardous Materials. *Accident Anlysis and Prevention,* 39, 1015-1025.

35. Liu, X., Saat, M.R., Barkan, C.P.L. (2013). Integrated Risk Reduction Framework to Improve Railway Hazardous Materials Transportation Safety. *Journal of Hazardous Materials,* 260, 131-140.

36. Erkut, E., Verter, V. (1995). Hazardous materials logistics. *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*. Berlin: Springer, 467-506.

37. Erkut, E. (1993). Inequality Measures for Location Problems. *Location Science*, 1, 199-217.

38. Mandell, M.B. (1991). Modeling Effectiveness-Equity Tradeoffs in Public Service Delivery Systems. *Management Science,* 37, 467-482.

39. Romero, N., Nozick, N.K., Xu, N. (2016). Hazmat facility location and routing analysis with explicit consideration of equity using the Gini coefficient. *Transportation Research Part E,* 89, 165-181.

40. Zografos, K.G. ve Davis, C. F. (1989). Multiobjective programming approach for hazardous materials. *Journal of Transportation Engineering,* 115, 661-673.

41. List, G. ve Mirchandani, P.B. (1991). An Integrated Network/Planar Multiobjective Model for Routing and Siting for Hazardous Materials and Wastes. *Transportation Science*, 25, 146-156.

42. Erkut, E. ve Neuman, S. (1992). A Multiobjective Model for Locating Undesirable Facilities. *Annals of Operations Research,* 40, 209-227.

43. Gopalan, R., Kolluri, K.S., Batta, R. ve Karwan, M.H. (1990). Modeling Equity of Risk in the Transportation of Hazardous Materials. *Operations Research,* 38, 961-973.

44. Current, J. ve Ratick, S. (1996). A model to assess risk, equity and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials. *Location Science,* 3(3), 187-201.

45. Kang, Y., Batta, R., Kwon, C. 2014. Generalized route planning model for hazardous material transportation with VaR and equity considerations. *Computers and Operations Research,* 43, 237-247.

46. Garrido, R.A., Bronfman, A.C. (Baskıda). Equity and social acceptability in multiple hazardous materials routing urban areas. *Transportation Research Part A,* 1-17.

47. Daskin, M.S. (1995). *Network and Discrete Location Models, Algorithms and Applications.* Amerika Birleşik Devletleri: John Wiley & Sons Inc., 341-343.

48. Zografos, K.G. ve Samara, S. (1989). A Combined Location-Routing Model for Hazardous Waste Transportation and Disposal. *Transportation Research Record,* 1245, 52-59.

49. List, G. ve Mirchandani, P.B. (1991). An Integrated Network/Planar Multiobjective Model for Routing and Siting for Hazardous Materials and Wastes. *Transportation Science,* 25, 146-156.

50. Stowers, C.L. ve Palekar, U.S. (1993). Location Models with Routing Considerations for a Single Obnoxious Facility. *Transportation Science,* 27(4), 350-362.

51. List, G. (1993). Siting Emergency Response Teams: TradeoffsAmong Response Time, Risk, Risk Equity and Cost. In L. Moses and D. Lindstrom (Eds.), *Transportation Of Hazardous Materials.* Boston: Kluwer Academic Publishers, 117-134.

52. Mirchandani, P. B., Rebello, R., Agnetis, A. (1995). The inspection station location problem in hazardous material transportation: some heuristics and bounds. *INFOR,* 33(2), 100-113.

53. List, G. F., Turnquist, M. A. (1998). Routing and emergency- response-team siting for high-level radioactive waste shipments. *IEEE Transactions On Engineering Management,* 45(2), 141-152.

54. Wyman, M.M., Kuby, M. (1995). Proactive optimization of toxic waste transportation, location and technology. *Location Science,* 3(3), 167-185.

55. Helander, M. E., Melachrinoudis,E. (1997). Facility location and reliable route planning in hazardous materials transportation. *Transportaion Science,* 31(3), 216-226.

56. A.K. Nema, and K.S. Gupta. (2003). Multiobjective risk analysis and optimization of regional hazardous waste management system. *Practice Periodical of hazardous, toxic, and radioactive waste management,* 7(2), 69-77.

57. Cappanera, P., Gallo, G., Maffioli, F. (2004). Discrete Facility Location and Routing of Obnoxious Activities. *Discrete Applied Mathematics,* 133, 3-28.

58. Jiang, Y., Zhang, X., Rong, Y., Zhang, Z. (2014). A Multimodel Location and Routing Model for Hazardous Materials Transportation Based on Multi-Commodity Flow Model. *Procedia Social and Behavioral Sciences,* 138, 791-799.

59. Meiyi, W., Xiang, L., Lean, Y. (2015). Time-Dependant Fuzzy Random Location-Scheduling Programming for Hazardous Materials Transportaion. *Transportation Research Part C,* 57, 146-165.

60. Zhao, J., Verter, V. (2015). A Bi-objective Model for the Used Oil Location-Routing Problem. *Computers and Operations Research,* 62, 157-168.

61. Zhao, J., Huang, L., Lee, D.H., Peng,Q. (2016). Improved Approaches to the Network Design Problem in Regional Hazardous Waste Management Systems. *Transportation Research Part E,* 88, 52-72.

62. Yılmaz, Ö., Kara, B.Y., Yetiş, Ü. (Baskıda). Hazarous Waste Management System Design Under Population and Environmental Impact Considerations. *Journal of Environmental Management,* 1-12.

63. İnternet: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzu. (2014). URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.csb.gov.tr%2Fdb%2Fdestek%2Feditordosya%2FDuzenli_Depolama_Tesis_Saha_Yon_ve_isletme_kilavuzu.pdf&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

64. İnternet: Gaziantep Sanayi Odası Gaziantep Atık Arıtma ve Yakma ve Değerlendirme Tesisi Fizibilite Projesi Ön Fizibilite Raporu. (2012). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ika.org.tr%2Fupload%2Fyazilar%2F2011-DFD-Raporlari-188737.pdf&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

65. İnternet: İZAYDAŞ 2015 Yılı Yıllık Faaliyet Raporu. (2015). URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.izaydas.com.tr%2Ffiles%2Fdocuments%2Fizmit_atik_ve_artiklari-aritma-yakma_ve_degerlendirme-2015_yillik_faaliyet_raporu9_4_2016_14-31-43.pdf&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

66. İnternet: AKÇANSA, http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2FURL%3A+http%3A%2F%2Fwww.akcansacom.tr&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

67. İnternet: AKÇANSA Yıllık Faaliyet Raporu. (2015). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.akcansa.com.tr%2F+docs%2F+faaliyet2015.pdf&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

68. İnternet: Enerji Atlası. (2016). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2FURL%3Ahttp%3A%2F%2Fwww.enerjiatlasi.com%2Felektrik-fiyatlari%2F&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

69. İnternet: T.C. Merkez Bankası Kurlar Sayfası 21.04.2009 Günü Saat 15:30'da Belirlenen Gösterge Niteliğindeki Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Kurları. (2016). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tcmb.gov.tr%2Fkurlar%2F200904%2FApr_tr.html&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

70. İnternet: T.C. Merkez Bankası Kurlar Sayfası 21.09.2016 Günü Saat 15:30'da Belirlenen Gösterge Niteliğindeki Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Kurları. (2016). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tcmb.gov.tr%2Fkurlar%2Ftoday.xml&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

71. İnternet: Atık Yönetim Sistemleri için Yatırım ve İşletim Maliyetleri ve Çeşitli Atık Tipleri için Arıtım Fiyatları. (2007). *Life Hawaman Projesi Life06 TCY TR/ 000292*. URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fatanafs.com%2Fimages%2Fstories%2Fdownload%2FAtik_Yonetim_Sistemleri_icin_Yatirim_ve_sletim_Maliyetleri_ve_Cesitli_Atik_Turleri_icin_Aritim_Fiyatlari.pdf.pdf&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

72. İnternet: Gelir İdaresi Başkanlığı Amortisman Oranları. (2016). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.gib.gov.tr%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2FYararli_Bilgiler%2Famortisman_oranlari.pdf&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

73. İnternet: T.C. Şehircilik ve Çevre Bakanlığı Tehlikeli Atık İstatistikleri Bülteni. (2014). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.csb.gov.tr%2Fdb%2Fced%2Feditordosya%2F2014_YILI_TEHLIKELI_ATIK_ISTATISTIKLERI_15022016.pdf&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

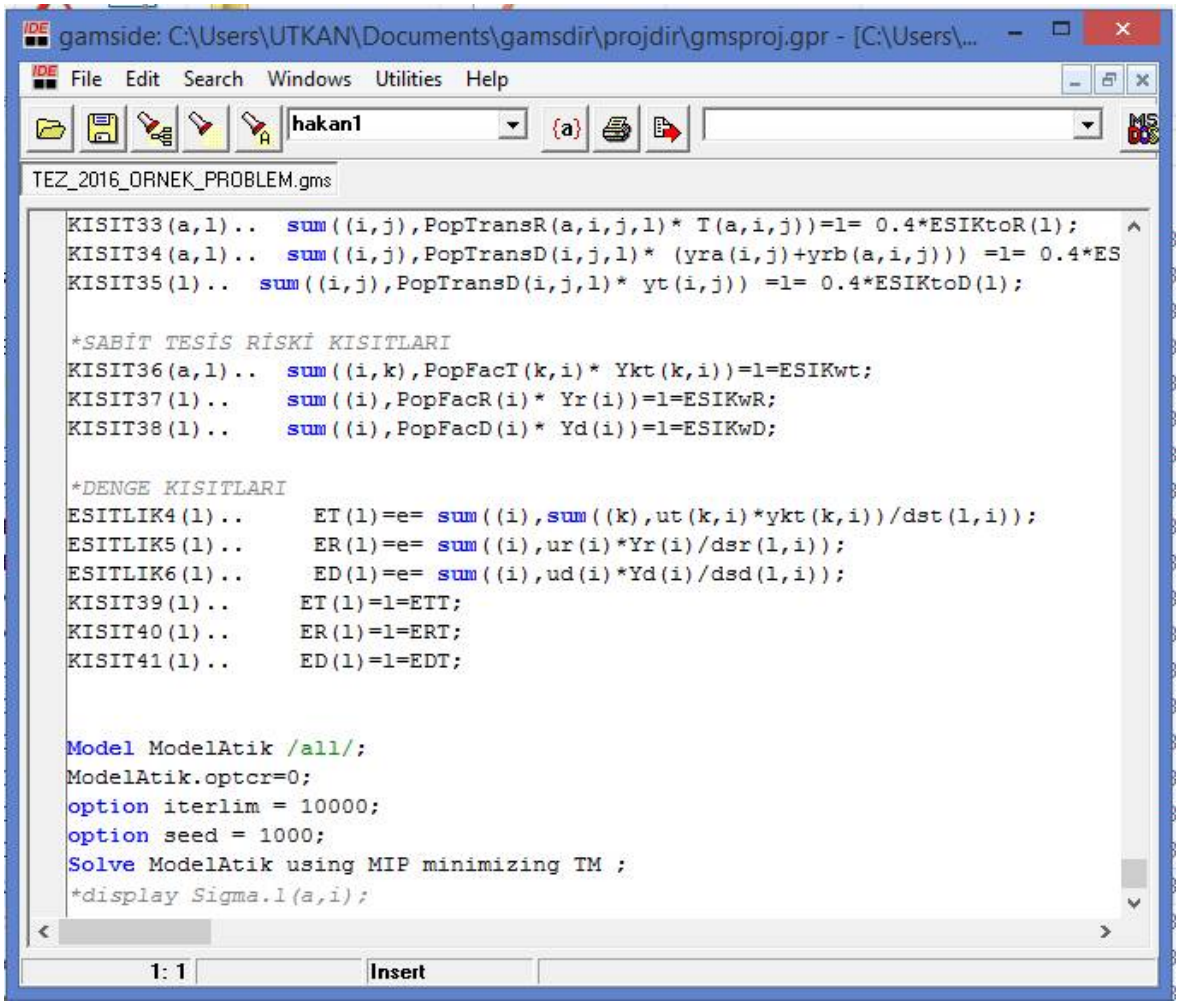
74. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2016). Veri temin yazısı. Sayı:39463277-145.01-E.5618, Konu: Veri Talebi, 04.04.2016, 17:55.

75. İnternet: Lastik Geri Dönüşüm Tesisi. (2016). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.bedriagac.org%2Findex.php%2Fcomponent%2Fcontent%2Farticle%2F2-projelerim%2F49-35-lastik-geri-doenueuem-tesisi%3FphpMyAdmin%3Dc534def7fa5a8b3a3fa41ef261fddef4%26phpMyAdmin%3DAsTAy%252C0AMATrDeQDoI9%252CnSsO77c&date=2016-11-24, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

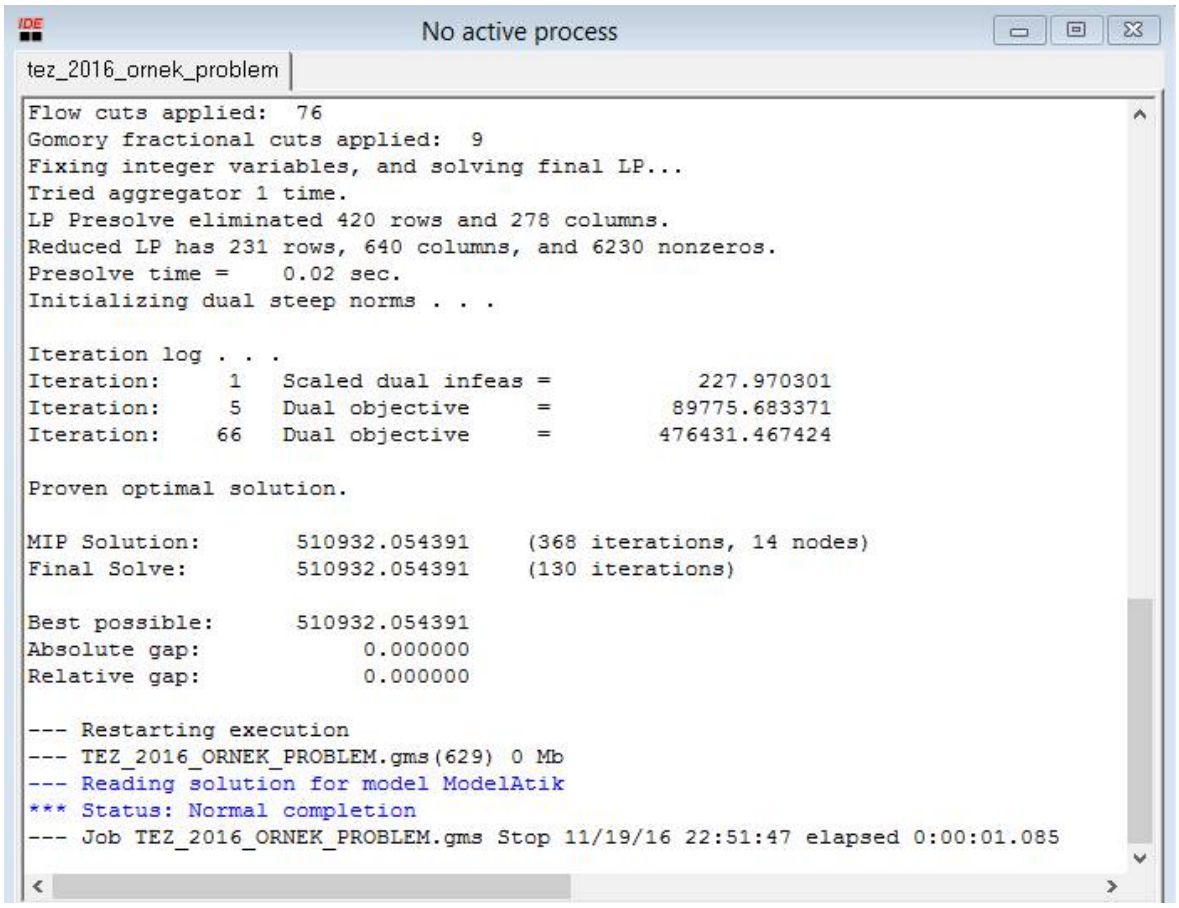
76. İnternet: Kullanım Dışı Kalan Atık Yağların Geri Dönüşümü, http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.bedriagac.org%2Findex.php%2Fcevreciprojeler%2Fkullanim-dii-kalan-atik-maden-yalarin-ger-doenueuemu&date=2016-11-24e, Son Erişim Tarihi: 24.11.2016.

EKLER

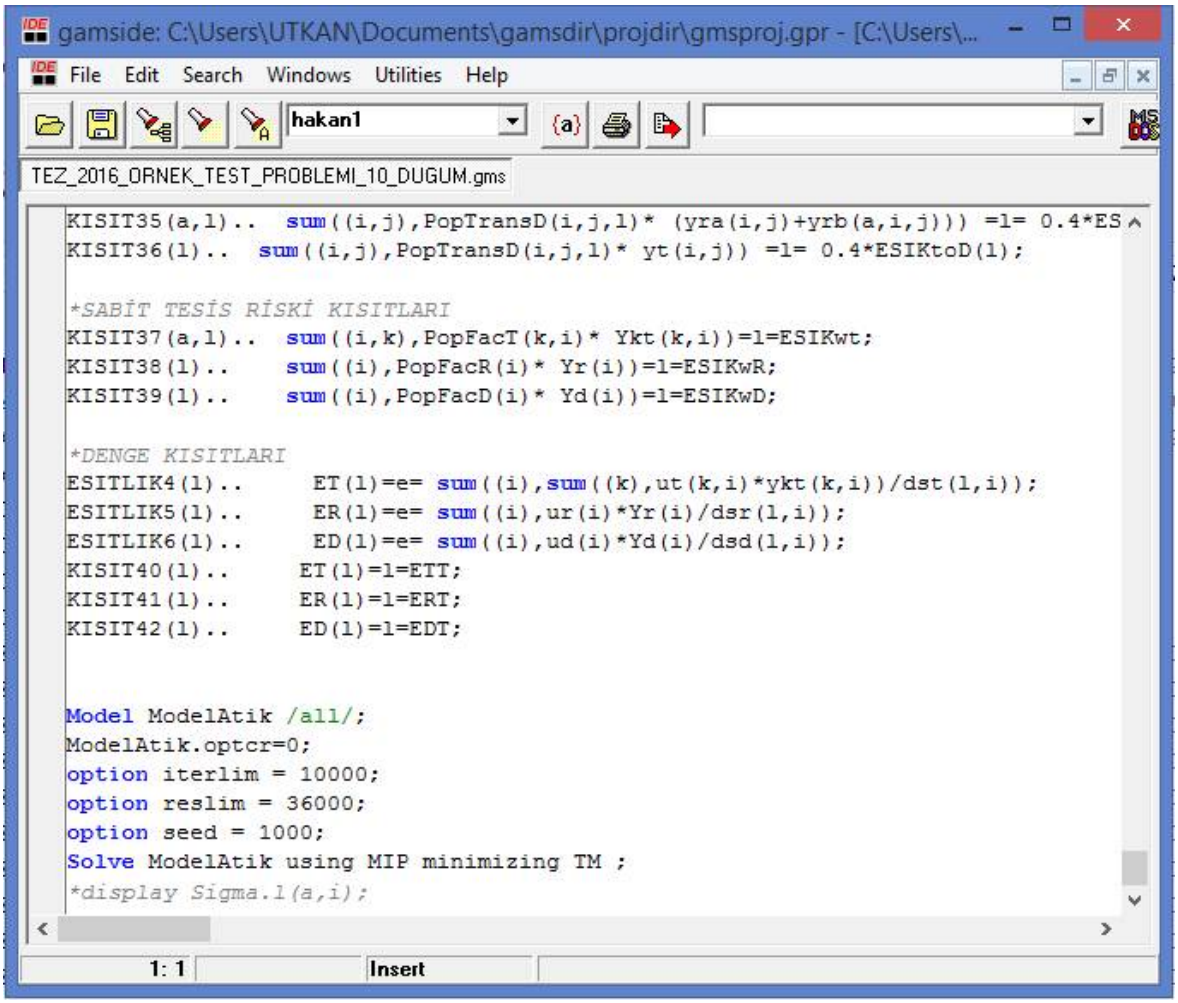
EK-1. Örnek problem için GAMS/CPLEX kodu



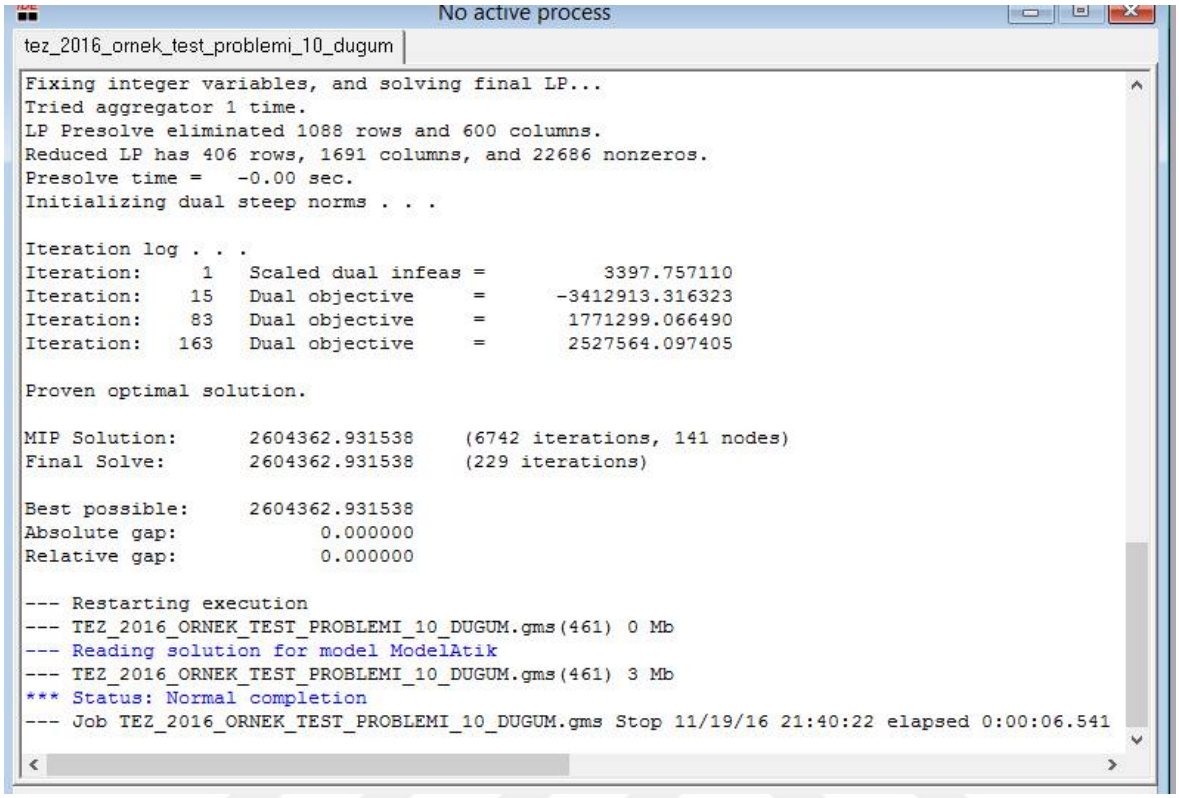
EK-2. Örnek problemin GAMS/CPLEX çözümü



EK-3. 10 düğümden oluşan test probleminin GAMS/CPLEX kodu



EK-4. 10 düğümden oluşan test probleminin GAMS/CPLEX çözümü



EK-5. Marmara Bölgesi 2014 yılı tehlikeli atık üretim miktarı

Çizelge 5.1. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı verilerine göre Marmara Bölgesi'nin il bazında 2014 yılı tehlikeli atık üretim miktarı

İL	ATIK KODU	TEKNOLOJİ	YILLIK ATIK MİKTARI (KG)
Balıkesir	050103	D10	306
Balıkesir	050103	R1	869
Balıkesir	120120	R12	365 409
Balıkesir	120120	R4	204 818
Balıkesir	150110	D10	2 485
Balıkesir	150110	R1	200
Balıkesir	150110	R12	632 928
Balıkesir	150110	R4	153 290
Balıkesir	150202	D10	1 350
Balıkesir	150202	R1	1 100
Balıkesir	150202	R1	1 390
Balıkesir	150202	R12	297 030
Balıkesir	180103	D5	611
Balıkesir	180103	D9	629 814
Balıkesir	180103	R5	81 150
Balıkesir	190813	R12	6 170
Bilecik	100207	R4	761 770
Bilecik	120120	R12	8 532
Bilecik	120120	R4	61 806
Bilecik	150110	D10	4 050
Bilecik	150110	D5	796
Bilecik	150110	R1	1 450
Bilecik	150110	R12	539 759
Bilecik	150110	R4	4 200
Bilecik	150202	D10	11
Bilecik	150202	R1	4 790
Bilecik	150202	R12	134 173
Bilecik	180103	D9	139 250
Bilecik	190813	R1	6 840
Bilecik	190813	R12	33 650
Bursa	040219	D10	1 345
Bursa	040219	R1	121
Bursa	040219	R12	71 230
Bursa	050103	D10	1 410
Bursa	050103	R1	25
Bursa	050103	R1	917
Bursa	100207	R4	13 513 310
Bursa	120120	R12	226 392
Bursa	120120	R4	932 835
Bursa	150110	D10	41 655
Bursa	150110	R1	2 000

EK-6. Tehlikeli atık işleme, geri kazanım ve bertaraf yöntemleri [3]

Bertaraf Yöntemleri

D1 Toprağın altında veya üstünde düzenli depolama (örneğin, düzenli depolama ve benzeri),

D2 Arazi ıslahı (örneğin, sıvı veya çamur atıkların toprakta biyolojik bozulmaya uğraması ve benzeri),

D3 Derine enjeksiyon (örneğin, pompalanabilir atıkların kuyulara, tuz kayalarına veya doğal olarak bulunan boşluklara enjeksiyonu ve benzeri),

D4 Yüzey doldurma (örneğin, sıvı ya da çamur atıkların kovuklara, havuzlara ve lagünlere doldurulması ve benzeri),

D5 Özel mühendislik gerektiren düzenli depolama (çevreden ve her biri ayrı olarak izole edilmiş ve örtülmüş hücresel depolama ve benzeri),

D6 Deniz/okyanus hariç bir su kütlesine boşaltım,

D7 Deniz yatakları dahil deniz/okyanuslara boşaltım,

D8 D1 ile D7 ve D9 ile D12 arasında verilen işlemlerden herhangi biri yoluyla atılan nihai bileşiklerin veya karışımların oluşmasına neden olan ve bu ekin başka bir yerinde ifade edilmeyen biyolojik işlemler,

D9 D1 ile D8 ve D10 ile D12 arasında verilen işlemlerden herhangi biri yoluyla atılan nihai bileşiklerin veya karışımların oluşmasına neden olan fiziksel-kimyasal işlemler (örneğin, buharlaştırma, kurutma, kalsinasyon ve benzeri),

D10 Yakma (Karada),

D11 Yakma (Deniz üstünde),

D12 Sürekli depolama (bir madende konteynerlerin yerleştirilmesi ve benzeri),

D13 D1 ila D12 arasında belirtilen işlemlerden herhangi birine tabi tutulmadan önce harmanlama veya karıştırma,

D14 D1 ila D13 arasında belirtilen işlemlerden herhangi birine tabi tutulmadan önce yeniden ambalajlama,

D15 D1 ila D14 arasında belirtilen işlemlerden herhangi birine tabi tutuluncaya kadar depolama (atığın üretildiği alan içinde geçici depolama, toplama hariç).

EK-6. (devam) Tehlikeli atık işleme, geri kazanım ve bertaraf yöntemleri [3]

Geri kazanım işlemleri

R1 Enerji üretimi amacıyla başlıca yakıt olarak veya başka şekillerde kullanma.

R2 Solvent (çözücü) ıslahı/yeniden üretimi,

R3 Solvent olarak kullanılmayan organik maddelerin ıslahı/geri dönüşümü (kompost ve diğer biyolojik dönüşüm prosesleri dahil),

R4 Metallerin ve metal bileşiklerinin ıslahı/geri dönüşümü,

R5 Diğer anorganik malzemelerin ıslahı/geri dönüşümü,

R6 Asitlerin veya bazların yeniden üretimi,

R7 Kirliliğin azaltılması için kullanılan parçaların (bileşenlerin) geri kazanımı,

R8 Katalizör parçalarının (bileşenlerinin) geri kazanımı,

R9 Yağların yeniden rafine edilmesi veya diğer yeniden kullanımları,

R10 Ekolojik iyileştirme veya tarımcılık yararına sonuç verecek arazi ıslahı,

R11 R1 ila R10 arasındaki işlemlerden elde edilecek atıkların kullanımı,

R12 Atıkların R1 ila R11 arasındaki işlemlerden herhangi birine tabi tutulmak üzere değişimi,

R13 R1 ila R12 arasında belirtilen işlemlerden herhangi birine tabi tutuluncaya kadar, atıkların ara depolanması (atığın üretildiği alan içinde geçici depolama, toplama hariç).

EK-7. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca lisans verilen Marmara Bölgesinde mevcut kurulu tehlikeli atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesisleri

Çizelge 7.1. Marmara Bölgesinde mevcut kurulu tehlikeli atık işleme, geri kazanım ve bertaraf etme tesisleri

YERLEŞİM YERİ	TESİS TİPİ	İŞLETMENİN ADI	İŞLETMENİN LİSANS KAPSAMI
BALIKESİR	GERİ KAZANIM, İŞLEME	ÖZNAK HURDACILIK GERİ DÖNÜŞÜMLÜ ATIK DEĞ.MÜH.HİZ.ORM.ÜR.İNŞ.İŞL.MAD.PET. ÜR.OTOM.SAN.TİC.LTD.ŞTİ	Tehlikeli Atık Geri Kazanım,Tehlikesiz Atık Geri Kazanım,Ambalaj Atığı Geri Kazanım,Ömrünü Tamamlamış Araç Geçici Depolama,Ambalaj Atığı Toplama ve Ayırma,Tanker Temizleme,PCB Arındırma
BALIKESİR	GERİ KAZANIM	BANPLAS GERİ DÖNÜŞÜM İŞLEM. İNŞ. HAFR. SAN. ve TİC. LTD.ŞTİ. (Tehlikeli Atık Geri Kazanım Tesisi)	Tehlikeli Atık Geri Kazanım
BALIKESİR	GERİ KAZANIM	ALTIN HURDA GERİ DÖNÜŞÜM MADDELERİ SANAY İ VE TİCARET LTD.ŞTİ	Tehlikeli Atık Geri Kazanım,Tehlikesiz Atık Geri Kazanım
BALIKESİR	GERİ KAZANIM, İŞLEME	ÖZNAK HURDACILIK GERİ DÖNÜŞÜMLÜ ATIK DEĞ.MÜH.HİZ.ORM.ÜR.İNŞ.İŞL.MAD.PET. ÜR.OTOM.SAN.TİC.LTD.ŞTİ	Tehlikeli Atık Geri Kazanım,Tehlikesiz Atık Geri Kazanım,Ambalaj Atığı Geri Kazanım,Tanker Temizleme,Atık Elektrikli ve Elektronik Eşya İşleme,PCB Arındırma,Ömrünü Tamamlamış Araç Geçici Depolama,Ambalaj Atığı Toplama ve Ayırma
BALIKESİR	İŞLEME	BALIKESİR İLİ SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇEVRE YÖNETİMİ BELEDİYELER BİRLİĞİ	Düzenli Depolama - 2. Sınıf (Belediye Atıkları ve Tehlikesiz Atık Düzenli Depolama),Tıbbi Atık Sterilizasyon,Ambalaj Atığı Toplama ve Ayırma
BANDIRMA	GERİ KAZANIM	BLACKGREEN METAL TEKNOLOJİLERİ ÜRETİM VE TİCARET A.Ş. GÖNEN ŞUBESİ	Hava Emisyon,Tehlikesiz Atık Geri Kazanım,Tehlikeli Atık Geri Kazanım
BALIKESİR	BERTARAF	LİMAK BATI ÇİMENTO SAN. VE TİC. A.Ş. BALIKESİR ŞUBESİ	Hava Emisyon,Atık Yakma ve Beraber Yakma
BİLECİK	GERİ KAZANIM	EVREN METAL SANAYİ VE TİCARET ANONİM ŞİRKETİ BİLECİK ŞUBESİ	Hava Emisyon,Tehlikeli Atık Geri Kazanım,Tehlikesiz Atık Geri Kazanım
BİLECİK	GERİ KAZANIM, İŞLEME	ARSLAN ALÜMİNYUM ANONİM ŞİRKETİ BİLECİK 3. ŞUBESİ	Hava Emisyon,Atıksu Deşarjı,Hurda Metal /ÖTA İşleme,Tehlikeli Atık Geri Kazanım,Tehlikesiz Atık Geri Kazanım,Ambalaj Atığı Geri Kazanım
BİLECİK	GERİ KAZANIM	ÖZTÜRKLER METAL SANAYİ VE TİCARET A. Ş.-BİLECİK ŞUBESİ	Hava Emisyon,Tehlikesiz Atık Geri Kazanım,Tehlikeli Atık Geri Kazanım

EK-8. Tesis istenmeyen etkisinden etkilenen nüfus
Çizelge 8.1. Tesislerin 1 000 m dış sınırı içinde bulunan nüfus

Sıra No	Tesis Yerleşim Yeri	Etkilenen Nüfus
1	Balıkesir	58426
2	Bandırma	0
3	Bilecik	12054
4	Bursa	66339
5	Nilüfer	0
6	Osmangazi	269669
7	İnegöl	135408
8	Gemlik	132951
9	Orhangazi	14742
10	Kestel	200109
11	Çanakkale	56420
12	Ezine	1253
13	Biga	3855
14	Edirne	0
15	Lalapaşa	0
16	Başakşehir	2821
17	Esenyurt	3701152
18	Tuzla	2821
19	Bağcılar	2821
20	Küçükçekmece	2821
21	Pendik	9873500
22	Silivri	465465
23	Arnavutköy	2821
24	Kırklareli	0
25	Pınarhisar	20515
26	Vize	0
27	Lüleburgaz	52965
28	Kocaeli	186354
29	İzmit	324079
30	Başiskele	101558
31	Derince	156281
32	Darıca	85131
33	Körfez	132371
34	Çayırova	270164
35	Dilovası	0
36	Gebze	62118
37	Sakarya	552388
38	Erenler	70329
39	Tekirdağ	144679
40	Çerkezköy	0
41	Ergene	64815
42	Çorlu	0
43	Kapaklı	104449
44	Yalova	14575

EK-9. Tesis yerleşim yerleri arasındaki mesafeler
Çizelge 9.1. Tesis yerleşim yerleri arasındaki yol mesafeleri

Sıra No	Yerleşim Yeri	Yerleşim Yeri	Mesafe (m)
1	Balıkesir	Balıkesir	0
2	Balıkesir	Bandırma	82210
3	Balıkesir	Bursa	135771
4	Balıkesir	Biga	135895
5	Balıkesir	Nilüfer	138413
6	Balıkesir	Osmangazi	153258
7	Balıkesir	Kestel	157513
8	Balıkesir	Gemlik	164548
9	Balıkesir	Çanakkale	167529
10	Balıkesir	İnegöl	184259
11	Balıkesir	Orhangazı	186020
12	Balıkesir	Ezine	192229
13	Balıkesir	Yalova	213259
14	Balıkesir	Bilecik	230146
15	Balıkesir	Derince	247168
16	Balıkesir	Basiskele	257721
17	Balıkesir	İzmit	267382
18	Balıkesir	Körfez	292067
19	Balıkesir	Sakarya	293845
20	Balıkesir	Erenler	295193
21	Balıkesir	Dilovası	299793
22	Balıkesir	Gebze	310153
23	Balıkesir	Tuzla	315489
24	Balıkesir	Kocaeli	316170
25	Balıkesir	Çayırova	316190
26	Balıkesir	Tekirdağ	320467
27	Balıkesir	Darıca	321033
28	Balıkesir	Pendik	328492
29	Balıkesır	Çorlu	348435
30	Balıkesir	Ergene	356371
31	Balıkesir	Lüleburgaz	358004
32	Balıkesir	Çerkezkoy	369760
33	Balıkesir	Kapaklı	375055
34	Balıkesir	Bağcılar	378540
35	Balıkesir	Başaksehir	379244
36	Balıkesir	Küçükçekmece	379333
37	Balıkesir	Edirne	381611
38	Balıkesir	Kırklareli	388663
39	Balıkesir	Esenyurt	390169
40	Balıkesir	Pınarhisar	390836
41	Balıkesir	Arnavutköy	396517

EK-9. (devam) Tesis yerleşim yerleri arasındaki mesafeler
Çizelge 9.2. Tesis yerleşim yerleri arasındaki kuş uçumu mesafeler

Sıra No	Yerleşim Yeri	Yerleşim Yeri	Mesafe (m)
1	Balıkesir	Balıkesir	0,1
2	Balıkesir	Bandırma	67651
3	Balıkesir	Biga	103480
4	Balıkesir	Bursa	114436
5	Balıkesir	Nilufer	115625
6	Balıkesir	Osmangazi	128401
7	Balıkesir	Kestel	131799
8	Balıkesir	Gemlik	136595
9	Balıkesir	Çanakkale	137629
10	Balıkesir	İnegöl	148913
11	Balıkesir	Ezine	150339
12	Balıkesir	Orhangazi	156634
13	Balıkesir	Tekirdağ	157607
14	Balıkesir	Çorlu	169506
15	Balıkesir	Silivri	173552
16	Balıkesir	Esenyurt	174545
17	Balıkesir	Yalova	176674
18	Balıkesir	Bağcılar	177113
19	Balıkesir	Darıca	180056
20	Balıkesir	Arnavutköy	180058
21	Balıkesir	Küçükcekmece	180540
22	Balıkesir	Başakşehir	180716
23	Balıkesir	Çerkezköy	180815
24	Balıkesir	Ergene	181728
25	Balıkesir	Pendik	185246
26	Balıkesir	Kapaklı	186834
27	Balıkesir	Çayırova	188500
28	Balıkesir	Kocaeli	188531
29	Balıkesir	Tuzla	190158
30	Balıkesir	Bilecik	190304
31	Balıkesir	Dilovası	192428
32	Balıkesir	Gebze	194588
33	Balıkesir	Körfez	195918
34	Balıkesir	Lüleburgaz	204962
35	Balıkesir	Derince	208760
36	Balıkesir	Basiskele	217927
37	Balıkesir	İzmit	224903
38	Balıkesir	Vize	225471
39	Balıkesir	Pınarhisar	225843
40	Balıkesir	Kırklareli	227144
41	Balıkesir	Sakarya	249507

EK-10. Marmara Bölgesinde tehlikeli atık yönetiminin uygulamasına ait GAMS/CPLEX kodu

C:\Users\UTKAN\Desktop\00_TEZ 2015\01_TEZ_2015\00_TEZ_GÜNCEL Ç...

TEZ_Marmara_Bol_Uygulama_SN1.gms | TEZ_Marmara_Bol_Uygulama_SN1.lst

```
KISIT30(i,a)..  sum(j,PopTransW(i,j)* X(a,i,j))=l= 1.0*TkatsT* sum(j,P

* 2. Geri kazanım tesisine geri kazanım maddesi taşınması

KISIT31(i,a,k)..  sum((j),PopTransR(i,j)* (M(a,i,j)+T(a,i,j)))=l= 1.0*

* 3. Atık bertaraf etme tesisine atık kalıntısı taşınması

KISIT32(i,a,k)..  sum((j),PopTransD(i,j)* (yg(a,i,j)+yt(a,i,j)+yra(a,i

*DENGE KISITLARI

KISIT36(j)..  sum(i,sum((k,a), PopFacT(i)*Teta(a,k,i))/dst(i,j))=l=1.0

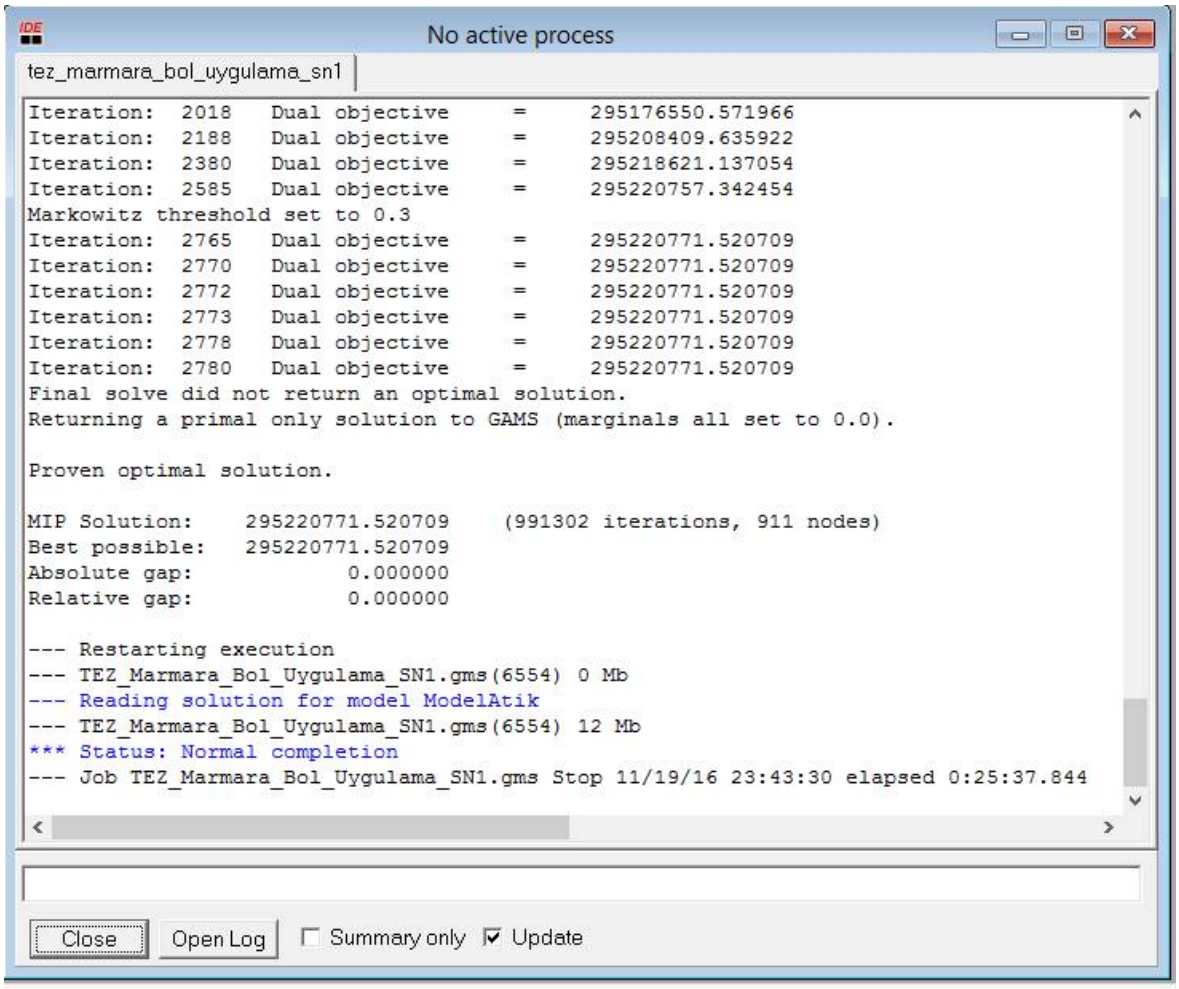
KISIT37(j)..  sum(i,sum((e,a), PopFacR(i)*(SigmaR(a,e,i)+SigmaT(a,e,i)

KISIT38(j).. sum(i,sum((b,a), PopFacD(i)*(dg(a,b,i)+dra(a,b,i)+drb(a,b



Model ModelAtik /all/;
ModelAtik.optcr=0;
ModelAtik.holdfixed = 1;
ModelAtik.dictfile = 0;
option iterlim = 100000;
option reslim = 36000;
option seed = 1000;
option solvelink = 0;
```

EK-11. Marmara Bölgesinde tehlikeli atık yönetiminin uygulamasına ait GAMS/CPLEX çözümü



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : UTKU, Durdu Hakan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1971, Ceylanpınar
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (505) 506 93 72
e-mail : dhakanutku@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Bilkent Üniversitesi /Endüstri Mühendisliği	2000
Lisans	Kara Harp Okulu /İşletme	1992
Lise	Kuleli Askeri Lisesi	1988

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1992-2014	Kara Kuvvetleri Komutanlığı	Subay

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Utku, D.H. and Sabuncuoğlu, İ. (2002). Evaluation of army corps artillery ammunition supply systems via simulation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 917-921.
2. Utku, D.H. and Erol, S. (2016, 2-4 Haziran). Tehlikeli atık yönetimi modeli. 17. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması ve İstatistik Sempozyumunda sunuldu, Sivas.

Hobiler

Spor



GAZİ GELECEKTİR...