
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TERS ÇOK KRİTERLİ SIRALAMA PROBLEMİ İÇİN BULANIK MATEMATİKSEL MODELLER

Billur ECER AKTAŞ

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2020

Billur ECER AKTAŞ tarafından hazırlanan "TERS ÇOK KRİTERLİ SIRALAMA PROBLEMİ İÇİN BULANIK MATEMATİKSEL MODELLER" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. Ergün ERASLAN

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Mehmet KABAK

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Başkent Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Ebru YÜKSEL HALİLOĞLU

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 14/09/2020

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

……

Prof. Dr. Cevriye GENCER

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.

Billur ECER AKTAŞ

14/09/2020

TERS ÇOK KRİTERLİ SIRALAMA PROBLEMİ İÇİN BULANIK MATEMATİKSEL MODELLER

(Doktora Tezi)

Billur ECER AKTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Sınıflandırma problemi, nesnelerin önceden belirlenmiş kurallara bağlı olarak sınıflara atanmasına odaklanan bir çok kriterli karar verme problemi türüdür. Sınıflandırma problemleri, nesnelerin atanacağı sınıfların arasında tercih sırası olup olmadığına göre çok kriterli sınıflandırma ve sıralama problemleri olarak iki grupta incelenmektedir. Bu problem türlerinden sıralama problemlerinin bir uzantısı olarak Ters Çok Kriterli Sıralama problemi ilk kez 2015 yılında literatüre sunulmuştur. Bu problemin literatüre katkısı, karar vericilerin nesnelerin mevcut durumlarını iyileştirecek eylemler arasında seçim yaparak nesneleri daha öncelikli olarak tercih edilen sınıflara yükseltmesine imkân sağlamasıdır. Ters çok kriterli sıralama problemi, nesnelerin kriter bazında puanlarını değiştirecek eylemleri belirleyerek yeni durumdaki sınıflandırmanın karar verici tarafından istenen durumu sağlamasını hedefler. Bu tez çalışmasında, Ters Çok Kriterli Sıralama probleminin bulanık belirsiz parametrelerle ifade edildiği durum ele alınmaktadır. Çeşitli problem varsayımları, amaç fonksiyonları ve sıralama yaklaşımları dikkate alınarak bulanık parametreler içeren beş yeni bulanık matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Enerji, eğitim, araştırma ve turizm alanlarından örnek problemler için modeller çözülerek elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Sınıflandırma probleminin geniş bir uygulama alanına sahip olması nedeniyle, önerilen modellerin problem parametrelerindeki belirsizliği göz önünde bulundurarak optimum iyileştirme planı geliştirmek isteyen karar vericilerin kullanımı için faydalı bir karar destek aracı olabilecektir.

Bilim Kodu	:	90601
Anahtar Kelimeler	:	Ters çok kriterli sıralama problemi, tamsayılı programlama, bulanık mantık, çok kriterli sınıflandırma
Sayfa Adedi	:	121
Danışman	:	Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN

FUZZY MATHEMATICAL MODELS FOR INVERSE MULTIPLE CRITERIA SORTING PROBLEM

(Ph. D. Thesis)

Billur ECER AKTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2020

ABSTRACT

Classification applications is a multiple criteria decision making application class, which focuses on the assignment of objects into classes based on predefined classification rules. Classification applications are divided into two groups as classification problems and sorting problems in views of existence of preference order between classes. Inverse Multiple Criteria Sorting problem was introduced into literature in 2015 as an extension of multiple criteria sorting problems. The contribution of this problem to the literature is that the problem allows decision makers to change the class assignments of objects to more preferred classes by selecting among actions that improve the present conditions of objects. Inverse multiple criteria sorting problem aims to ensure the desired classification of objects by the decision maker by determining the actions that change the initial score of objects in views of sorting criteria. In this thesis study, existence of fuzzy parameters in the first proposed Inverse Multiple Criteria Sorting model is considered. Five new fuzzy mathematical programming models with fuzzy parameters were proposed by taking various problem assumptions, objective functions and sorting approaches into account. The proposed models were solved for several examples of energy, education, research and tourism areas and obtained solution results were interpreted. Due to the wide application area of classification problems, the proposed models can be considered as useful decision support tools for decision makers, who wants to develop optimum improvement plans by considering parameter uncertainties.

Science Code	:	90601
Key Words	:	Inverse multiple criteria sorting problem, integer programming, fuzzy logic, multiple criteria classification
Page Number	:	121
Supervisor	:	Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN

TEŞEKKÜR

Üstün deneyim ve bilgi birikimiyle tezimi yönlendiren, tez çalışmam sürecinde desteği ve yol göstericiliğiyle yanımda olduğunu hissettiren değerli danışmanım Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimde çalışmalarımı inceleyen, özveri ve sabırla yol gösteren, tezin her aşamasında yaptığı katkılarla bir jüri üyesinden çok daha fazlası olan Prof. Dr. Mehmet KABAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Kıymetli önerileriyle tezimi zenginleştiren Prof. Dr. Ergün ERASLAN'a rehberliği için teşekkür ederim.

Tez savunmamda yaptıkları yapıcı önerilerle tezimin daha iyi hale gelmesini sağladıkları için Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ ve Doç. Dr. Ebru YÜKSEL HALİLOĞLU'na katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında desteklerini sürekli hissettiğim kıymetli annem Zehra ECER'e ve yurt dışı doktora araştırmam sırasında kaybettiğim ve son anlarında yanında olamadığım için üzgün olduğum babam Orhan ECER'e en derin şükranlarımı sunarım. Beni her kararımda destekleyen, yalnız bırakmayan, hoş gören, her türlü kahrımı çeken ve beni benden çok düşünen sevgili eşim Ahmet AKTAŞ'a ise ne kadar teşekkür etsem azdır.

Tez çalışmamın başında aramıza katılan, bana en güzel unvanı kazandıran canım oğluma hayatımda olduğu için çok teşekkür ederim. Bu tez sevgili babamın adını yaşatan kıymetli oğlum Mehmet Orhan AKTAŞ'a adanmıştır…

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. ÇOK KRİTERLİ SIRALAMA PROBLEMİ 5

3. TERS ÇOK KRİTERLİ SIRALAMA PROBLEMİ 11

3.1. Literatür Taraması 12

4. BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA 17

4.1. Carlsson ve Korhonen'in Bulanık Çözüm Yaklaşımı 21

4.2. Vergeday'ın Bulanık Çözüm Yaklaşımı 26

5. BULANIK BELİRSİZLİK ALTINDA TEK AMAÇLI MODELLER .. 35

5.1. Model – 1: Doğrusal Ayrıştırma Fonksiyonu ile Sıralama 35

5.1.1. Örnek problem – 1 37

5.1.2. Örnek problem – 2 42

5.2. Model – 2: Eylemleri Farklı Uygulayıcıların Yapabildiği Durum 48

5.2.1. Örnek problem – 1 51

5.2.2. Örnek problem – 2 55

5.3. Model – 3: Eklemeli Fayda Fonksiyonuna Dayalı Sıralama 60

5.3.1. Örnek problem – 1 64

Sayfa

5.3.2. Örnek problem – 2 68

6. BULANIK BELİRSİZLİK ALTINDA İKİ AMAÇLI MODELLER 75

6.1. Model – 4: Doğrusal Ayrıştırma Fonksiyonu ile İki Hedefli Sıralama..... 75

6.1.1. Örnek problem – 1 78

6.1.2. Örnek problem – 2 82

6.2. Model – 5: Fayda Fonksiyonuna Dayalı İki Hedefli Sıralama 86

6.2.1. Örnek problem – 1 89

6.2.2. Örnek problem – 2 91

7. DUYARLILIK ANALİZİ 95

8. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 101

KAYNAKLAR 103

EKLER..... 109

EK-1. Model – 1 için ilk örnek problemin GAMS kodu 110

EK-2. Model – 2 için ilk örnek problemin GAMS kodu 112

EK-3. Model – 3 için ilk örnek problemin GAMS kodu 114

EK-4. Model – 4 için ilk örnek problemin GAMS kodu 116

EK-5. Model – 5 için ilk örnek problemin GAMS kodu 118

ÖZGEÇMİŞ 120

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Hastane sınıflarına ilişkin üst sınır değerler 13

Çizelge 3.2. Hastanelerin performans değerleri 13

Çizelge 3.3. Sınıflara göre kriterlerin birim fayda değerleri 14

Çizelge 4.1. Doğrusal programlama problemlerinde olası bulanık durumlar 18

Çizelge 4.2. Bulanık sayıların uygulama alanları 19

Çizelge 4.3. Carlsson ve Korhonen yaklaşımı ile örnek problemde elde edilen çözüm sonuçları 26

Çizelge 4.4. Örnek problemin kesin durum için optimum çözümü 28

Çizelge 4.5. Parametrik programlama yaklaşımı ile elde edilen çözüm tablosu 29

Çizelge 4.6. Parametrik programlama ile farklı üyelik değerleri için elde edilen çözüm sonuçları 30

Çizelge 4.7. Model tipleri 31

Çizelge 5.1. Binaların mevcut durumda kriter bazında puanları 39

Çizelge 5.2. Eylemlerin bulanık maliyet ve etki değerleri 39

Çizelge 5.3. Kriter ağırlıkları 40

Çizelge 5.4. Sınıf sınır değerleri 40

Çizelge 5.5. Bina enerji verimi iyileştirme uygulaması için çözüm değerleri 41

Çizelge 5.6. Öğrencilerin konulara yatkınlık düzeyleri 43

Çizelge 5.7. Çözülecek örnek problemlerin öğrencilerin yatkınlığına etkisi 44

Çizelge 5.8. Final sınavı için belirlenen soru ağırlıkları 44

Çizelge 5.9. Harf notu alt sınır değerleri 45

Çizelge 5.10. Telafi dersi planlama uygulaması için çözüm değerleri 46

Çizelge 5.11. μ =0,5 için öğrenci yatkınlık düzeyleri ve harf notları 47

Çizelge 5.12. Örnek problem için mevcut kriter bazında puan değerleri 52

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.13. Binaların başlangıçtaki enerji sınıfları 52

Çizelge 5.14. İyileştirme eylemlerinin bina enerji performansına etki düzeyleri 53

Çizelge 5.15. Şirketlerin maliyet ve tamamlanma süresi teklifleri 53

Çizelge 5.16. Farklı üyelik değerleri için çözüm sonuçları 54

Çizelge 5.17. μ = 0,6 için bina performans puanları ve atandıkları sınıflar 55

Çizelge 5.18. Otel kalitesi iyileştirme örneği için mevcut durum puanları 56

Çizelge 5.19. İyileştirici eylemlerin etki düzeyleri 57

Çizelge 5.20. Uygulayıcıların maliyet ve tamamlanma süresi teklifleri 57

Çizelge 5.21. Kriter ağırlıkları 58

Çizelge 5.22. Otel sınıfları için alt sınır değerleri 58

Çizelge 5.23. Farklı üyelik değerleri için çözüm sonuçları 59

Çizelge 5.24. μ = 0,5 için otel performans puanları ve atandıkları sınıflar 60

Çizelge 5.25. Eylemlerin etki, maliyet ve süre değerleri 65

Çizelge 5.26. Fayda değer aralıkları alt sınır değerleri 65

Çizelge 5.27. Fayda değer aralıkları için birim fayda değerleri 65

Çizelge 5.28. Sınıflara atama için fayda değer aralıkları 66

Çizelge 5.29. Fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modeli sonuçları 67

Çizelge 5.30. Binaların fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modeli ile yapılan uygulama sonucu yeni durumları 68

Çizelge 5.31. Yayın taslakları için mevcut durum puanları 69

Çizelge 5.32. Yayın değerlendirme kriterleri için fayda değer aralıkları 70

Çizelge 5.33. Fayda değer aralıkları için birim fayda değerleri 70

Çizelge 5.34. Eylemlerin etki düzeyleri, gerekli kaynak ve süre değerleri 71

Çizelge 5.35. Yayın taslağı iyileştirme örneği için çözüm sonuçları 72

Çizelge 5.36. μ=0,8 için nesnelerin yeni durumları ve sınıf atamaları 73

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.1. Binaların kriter bazında mevcut puanları 78

Çizelge 6.2. Alternatif uygulayıcılara ait tadilat maliyeti değerleri..... 79

Çizelge 6.3. Alternatif uygulayıcılara ait tadilat süresi değerleri 79

Çizelge 6.4. Eylemlerin etki değerleri 79

Çizelge 6.5. Kriter ağırlıkları 79

Çizelge 6.6. Sınıf sınır değerleri 80

Çizelge 6.7. İki hedefli doğrusal ayrıştırma fonksiyonuna dayalı sıralama modeli sonuçları 80

Çizelge 6.8. Doğrusal ayrıştırma fonksiyonuna dayalı sıralama için hedef programlama modeli sonuçları 81

Çizelge 6.9. Alternatif uygulayıcılara ait soru çözme süresi değerleri 82

Çizelge 6.10. İki hedefli sınıf performansı iyileştirme uygulaması sonuçları 83

Çizelge 6.11. μ=0,6 için öğrencilerin başarı düzeyleri ve harf notları 84

Çizelge 6.12. μ=0,5 için öğrencilerin başarı düzeyleri ve harf notları 85

Çizelge 6.13. Eylemlerin etki değerleri ve maliyet değerleri 89

Çizelge 6.14. İki hedefli ekelemeli fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modeli sonuçları 90

Çizelge 6.15. Her bir üyelik değeri için seçilen eylemler ve bina sınıfları..... 90

Çizelge 6.16. Eylemler için gerekli kaynak değerleri..... 91

Çizelge 6.17. Yayın taslağı iyileştirme örneği için çözüm sonuçları 92

Çizelge 6.18. μ=0,9 için nesnelerin yeni durumları ve sınıf atamaları..... 93

Çizelge 7.1. Süre kısıt değeri değişiminin amaç fonksiyonu değerine etkisi 95

Çizelge 7.2. Hedef değer değişiminin amaç fonksiyonu değerine etkisi..... 96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Çok Kriterli Karar Verme sınıflandırması 1

Şekil 4.1. Bulanık doğrusal programlama türleri 19

Şekil 4.2. Model tipleri 31

Şekil 4.3. Bulanık parametreli TÇKSP ile problem çözümü için akış şeması 32

Şekil 4.4. Uygulanacak yöntem seçimine yönelik akış şeması 33

Şekil 7.1. Süre kısıtlamasının farklı değerleri için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri 95

Şekil 7.2. İşgücü kapasitesinin farklı değerleri için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri 97

SİMGELER VE KISALTMALAR

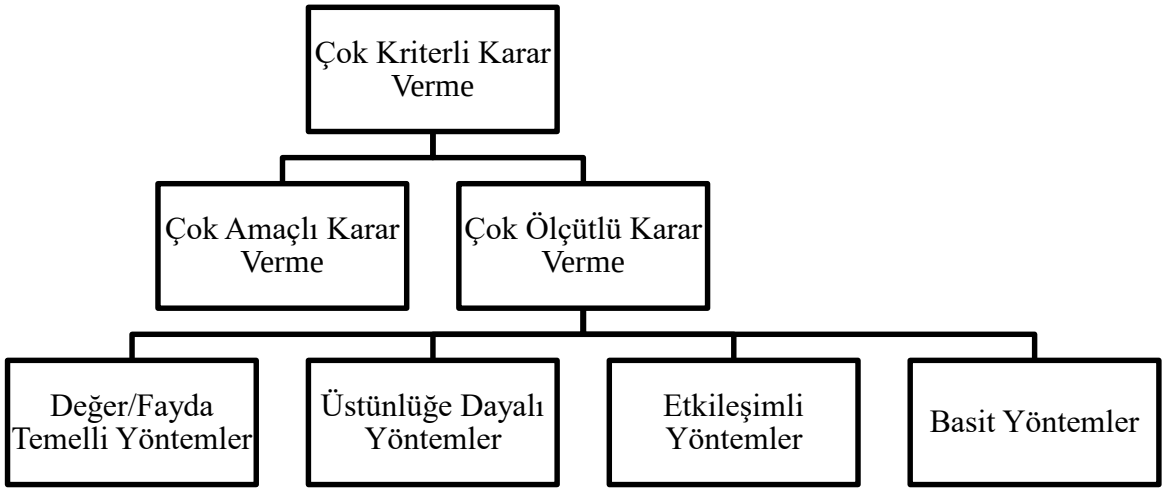
Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
μ	Üyelik derecesi

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
BEP – TR	Bina Enerji Performansı Yazılımı
ELECTRE – TRI	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité – TRI (Eliminasyon ve Gerçekliği Çeviren Seçim – TRI)
GAMS	General Algebraic Modelling Software
TÇKSP	Ters Çok Kriterli Sıralama Problemi
TL	Türk Lirası
UTADIS	Utilités Additives Discriminantes (Eklemeli Fayda Temelli Ayrıştırma)
VZA	Veri Zarflama Analizi

1. GİRİŞ

Çok Kriterli Karar Verme problemlerine literatürde yaygın olarak rastlamak mümkündür. Bu problemlerin birçoğu, nesnelerin önceden belirlenmiş gruplara atanmasını kapsamaktadır. Bu tür problemlerin çözümünde çok kriterli sıralama ve çok kriterli sınıflandırma teknikleri kullanılmaktadır. Çok kriterli sıralama uygulamalarında, nesnelerin atanacağı gruplar arasında en çok tercih edilenden en az tercih edilene doğru bir sıralama söz konusu iken, çok kriterli sınıflandırma uygulamalarında gruplar arasında tercih ilişkisi bulunmamakta ve nominal olarak tanımlanmaktadır. Sınıflandırma ve sıralama yöntemleri başta örüntü tanımlama [1], insan kaynakları yönetimi [2], finansal yönetim [3] ve ekonomi [4] olmak üzere pek çok alanda yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Çok Kriterli Karar Verme tipleri ile ilgili özet bilgi Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Çok kriterli karar verme sınıflandırması

Ters Çok Kriterli Sıralama problemi ise, sıralanacak nesnelerin istenen şekilde sıralanmasını garanti edecek şekilde, sıralanacak nesnelerin kriter bazında değerlendirmelerini değiştirmesi muhtemel eylemlerin seçimini hedeflemektedir. Muhtemel eylemlerden her birinin bir maliyete yol açtığı ve nesnelerin kriter bazında durumları üzerinde değişime sebep olacağı kabul edilmektedir.

Grupların belirlenmesinde kullanılan çeşitli sıralama yaklaşımları söz konusudur. Bu yaklaşımlara bağlı olarak ters çok kriterli sıralama problemini farklı kısıtlayıcılar kullanarak modellemek mümkündür. Ayrıca, olası eylemlerin seçiminde tercih edilecek amaç

fonksiyonu ve eylem kısıtlayıcılarına bağlı olarak farklı modeller geliştirilmesi de söz konusudur. Bu çalışmada sunulan üç model değer/fayda temelli yaklaşımlara örnek olabilirken, iki model hem değer/fayda temelli yaklaşımlara hem de çok amaçlı karar verme tekniğine örnektir.

Bazı durumlarda ele alınan karar probleminin parametreleri belirsizlik içerebilir. Belirsizlik altında karar vermek, karar vericiler için daha karmaşıktır. Bu nedenle problem parametrelerindeki belirsizliğin dikkate alınması karar desteği sağlamak açısından önemli bir bakış açısıdır. Belirsizliği ifade etmede bulanık mantık [5], stokastik modelleme [6], gri teori [7] gibi çeşitli yaklaşımlardan faydalanmak mümkündür.

Stokastik modelleme geçmiş verilerin mevcut olduğu ve istatistiksel dağılımlarının belirlenebildiği rassal terimlerin ifade edilmesi için yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Bu nedenle, stokastik modeller geçmişe dönük yeterli miktarda veriye sahip sistemleri tanımlamak için uygundur. Gri teori ise sınırlı sayıda veri içeren ve eksik bilgi barındıran belirsiz sistemleri modellemekte kullanılmaktadır. Ancak gri teori ile parametreye ilişkin net bir değer yerine sınırları bilinen ya da tanımlanabilen gri sayılar elde edilir. Bulanık küme teorisi ise, kesin olmayan veya dilsel terimlerle ifade edilebilen belirsizlik içeren terimler için uzmanların tecrübelerine dayanan ve üyelik fonksiyonlarıyla ifade edilebilen değerler sunar.

Bu tez çalışmasında problem parametrelerinin bazılarında bulanık belirsizlik bulunan Ters Çok Kriterli Sıralama problemi ele alınmıştır. Farklı kısıtlayıcılar ve amaç fonksiyonları ile parametrelerdeki belirsizliği dikkate alarak karar vericilere destek sağlayacak çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller örnek problemler üzerinde test edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir Problemin yapısı gereği sınıflandırma sonuçlarını değiştirecek eylemler için istatistiksel verilere erişmek mümkün olamayacağı için parametre değerlerindeki belirsizlikleri uzman görüşleri doğrultusunda ifade etme olanağı sunan bulanık sayılar kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırması doğrultusunda [8] bulanık parametreli doğrusal programlama modellerinin çözümünde kullanılan yaklaşımlardan model parametrelerindeki belirsizliğin türüne uygun olan Carlsson ve Korhonnen'in bulanık parametrik çözüm yaklaşımı ile Vergeday'ın bulanık çözüm yaklaşımı modellerin çözümünü elde etmede kullanılmıştır.

Çalışmanın özgün değeri, problem için şu ana kadar önerilen modellerin parametrelerinde bulanık belirsizliği dikkate alan tek ve iki amaçlı yeni modellerin geliştirilmesidir. Modellerin birçok sektöre uygun olarak dönüştürülmeye imkân tanıması avantaj sağlayan bir diğer yönüdür. Hem uygulayıcı seçimine hem de zaman kısıtlamasına imkân sağlayan modeller farklı alanlara kolayca adapte edilebilmektedir. Ayrıca çözüm sürelerinin kısalığı sebebiyle de kolayca çözüm alınabilmektedir. Geliştirilen modellerde kaynak (bütçe veya kapasite) ve zaman kısıtları altında seçilmesi uygun olan eylemler belirlenmiştir. Sunulan beş modelden dördünde zaman kısıtlaması aynı anda tek bir işin yapılmasına olanak sağlarken bir modelde farklı uygulayıcılar tarafından aynı anda farklı işlerin yapılabileceği durumu ele alınmıştır. Bu modelde farklı uygulayıcıların içinden işini en geç tamamlayanın çalışma süresi işin toplam tamamlanma süresi olarak ifade edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde Çok Kriterli Sıralama Problemi tanımlanarak, bu problemin çözümünde kullanılan sınıf belirleme yaklaşımları tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, Ters Çok Kriterli Sıralama Problemi açıklanmış, bir örnek ile problem ve elde edilmesi hedeflenen sonuçlar anlatılmıştır. Tez çalışması kapsamında geliştirilen bulanık matematiksel modellerin çözümünde kullanılan çözüm yaklaşımları dördüncü bölümde sunulmuştur. Geliştirilen bulanık matematiksel modeller ve örnek problem çözümleri beşinci bölümde tek amaçlı modelleri; altıncı bölümde ise iki amaçlı modelleri sunarak verilmiştir. Hedef programlama modellerine yönelik duyarlılık analizi sonuçları ve önerilen modellerin katkılarının değerlendirildiği yedinci bölümden sonra, genel değerlendirmeler ve gelecek araştırmalar için önerilere yer verilen sekizinci bölümle tez çalışması tamamlanmıştır.

2. ÇOK KRİTERLİ SIRALAMA PROBLEMİ

Çok kriterli sıralama ve sınıflandırma problemleri araştırmacılar tarafından yaygın olarak çalışılmaktadır. Her iki problem de bir nesne kümesindeki nesnelerin önceden belirlenmiş gruplara atanması ile ilgilidir. İki problem türü arasında grupların tanımlanma biçimine göre farklılık olup, sınıflandırma probleminde gruplar nominal bir şekilde tanımlanırken; sıralama probleminde gruplar en fazla tercih edilenden en az tercih edilene doğru sıralı biçimde tanımlanmaktadır [9].

Çok Kriterli Sıralama problemi aşağıdaki gibi tanımlanabilir [10]:

$A=\{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$ kümesinin elemanları olan sonlu sayıdaki nesne, $g=\{g_1, g_2, \ldots, g_n\}$ kümesi ile ifade edilen n kriter için değerlendirilmiştir. $I=\{1, 2, \ldots, m\}$ kümesi nesneleri ve $J=\{1, 2, \ldots, n\}$ kümesi kriterleri ifade ediyor olsun. Bir a_i nesnesi için, $g_j(a_i)$ i nesnesinin j kriteri temelindeki performansını göstermektedir. Nesnelerin, karar verici tarafından q farklı gruba atanmak suretiyle sıralanması istenmektedir. C_k ile k grubunun gösterildiği, C_1'in en çok tercih edilen ve C_q'nun en az tercih edilen grubu ifade ettiği kabul edilerek grup indisleri $K=\{1, 2, \ldots, q\}$ kümesi ile gösterilmektedir.

Sınıflandırma ve sıralama problemlerinden gerçek hayat problemlerinin çözümünde geniş bir yelpazede faydalanılması, araştırmacıları sınıflandırma ve sıralama modelleri için yöntemler geliştirmeye teşvik etmiştir. Bu tür modelleri geliştirirken gerçek hayat problemlerinin çok boyutlu doğasını dikkate alan bir çerçeve oluşturmak gerekmektedir.

Sınıflandırma ve sıralama problemleri için geliştirilen yöntemler istatistiksel, parametrik olmayan ve çok kriterli yöntemler olmak üzere üç grupta incelenebilir [11]. İstatistiksel yöntemler; ayrıştırma analizi [12] ve logit ve probit analizleridir [13]. Parametrik olmayan yöntemler; makine öğrenmesi [14], sinir ağları [15], bulanık küme teorisi [5] şeklinde sayılabilir. Çok kriterli yöntemler ise UTADIS [16] gibi tercih ayrıştırma yöntemleri ve ELECTRE – TRI [17] gibi doğrudan karar verme yöntemleridir.

Ayrıştırma analizi sınıflandırma ve sıralama problemlerinde sıklıkla kullanılan bir yaklaşım olup genel formu Eş. 2.1'de verilmiştir:

$$f(g)=\sum_{j=1}^{n} w_j g_j \tag{2.1}$$

Sadece w_j katsayılarının tahmin edilmesini gerektirmesi sebebiyle kullanımı kolaydır. Ayrıştırma fonksiyonu, uygun bir *b* değerinin grupları ayırma noktası olarak belirlendiği iki gruplu uygulamalarda Eş. 2.2'de gösterilen kural yardımıyla son derece kolay bir şekilde kullanılabilir.

$$\begin{aligned} f(a_i) \geq b \rightarrow a_i \in C_1 \\ f(a_i) < b \rightarrow a_i \in C_2 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Ayrıştırma fonksiyonu, çok gruplu durumlarda da yukarıdaki kurala benzer şekilde tanımlanan ek kesme noktaları yoluyla grup çiftlerini ayrıştırmak suretiyle kullanılabilir.
Çok kriterli sıralama ve sınıflandırma uygulamalarında sıklıkla kullanılan yaklaşımlardan bir diğeri de fayda fonksiyonlarıdır. Eklemeli fayda fonksiyonu Eş. 2.3'de verilmiştir:

$$U(g)=\sum_{j=1}^{n} u_j\left(g_j\right) \in [0,1] \tag{2.3}$$

$u_j(g_j)$, g_j kriterinin marjinal fayda fonksiyonudur. Her marjinal fayda fonksiyonu ilgili kriter ölçeğini fayda terimine dönüştüren bir mekanizma sağlamaktadır. Böyle bir dönüşüm mekanizması kullanmanın en büyük avantajı, nitel ve nicel her iki türde de kriterlerin dikkate alınmasını sağlamasıdır. Mevcut çoğu nicel modelleme biçimi, nitel kriterlerin nicel bir fonksiyonda kullanılması için onların nicel değere dönüştürülmesini gerektirmektedir. Diğer taraftan, fayda fonksiyonu kullanıldığında nitel ölçeklerin model girdisi olmak için nicel ölçeğe dönüştürülmesine gerek duyulmamakta, ölçek model çıktısında nicel değere dönüşmektedir.

i nesnesinin genel fayda değeri, tüm kriterler için toplam performans ölçümüne karşılık gelmektedir. Bu bakımdan, genel fayda nesnelerin önceden belirlenmiş gruplara atanmasına veya sıralanmasına karar vermek için bir ölçüt görevi görür. Sınıflandırma, alternatiflerin genel faydasının sınıf alt sınırlarını tanımlayan eşik değerleri ile kıyaslanması ile Eş. 2.4'te belirtilen şekilde gerçekleştirilir:

$$\begin{aligned} & U(a_i) \geq u_1 \rightarrow a_i \in C_1 \\ u_1 > & U(a_i) \geq u_2 \rightarrow a_i \in C_2 \\ & \cdots \\ u_{q-1} > & U(a_i) \rightarrow a_i \in C_q \end{aligned} \tag{2.4}$$

Yukarıda belirtilen kurallar, fayda teorisi çerçevesinin sıralama amacıyla uygulamasının en basit yoludur. Bu yaklaşım UTADIS yönteminde ve türevlerinde kullanılmaktadır.

Eklemeli fayda fonksiyonundan farklı, çarpımsal fayda fonksiyonu gibi daha karmaşık fayda ayrıştırma biçimlerini kullanmak da mümkündür. Çarpımsal fayda fonksiyonu daha genel bir tercih modellemesi biçimi sunmakta ve değerlendirme kriterleri arasındaki etkileşimleri dikkate almayı mümkün hale getirmektedir. Buna karşın çarpımsal fayda fonksiyonunu tahmin etmenin hesaplama zorluğunu artırması, sınıflandırma ve sıralama modellerinde kullanımını sınırlı kılmıştır.

Sınıflandırma ve sıralama modelleri üzerine yapılan son araştırmalar, yöneylem araştırması ve yapay zekâ tekniklerine dayanmaktadır. Sinir ağları, makine öğrenmesi, kaba kümeler, bulanık kümeler ve çok kriterli karar verme gibi metodolojiler araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır.

Yapay zekânın dallarından biri olan makine öğrenmesinin temellerinden biri modellerin örneklerden çıkarım yapmasıdır. Bu modeller fonksiyonsuz olup yapay sinir ağları gibi veya "eğer … öyleyse …" kalıbı veya karar ağaçları veya karar kuralları gibi ifade edilirler.

Kaba küme teorisi temelinde, karar örneklerinden karar kuralı tercih modellerinin oluşturulmasına yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Kaba kümeler başlangıçta özellikler arasındaki bağımlılıkları tanımlamak, anlamlılıklarını değerlendirmek ve tutarsız veri ile baş etmek için tanımlanmış olsa da sonradan çok kriterli karar verme uygulamalarında tercih modellemesi için kullanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır. Karar sınıflarını oluşturmak için kaba küme yaklaşımından faydalanıldığında, temel kaba küme yaklaşımındaki anlaşmazlık ilişkisi yerine baskınlık ilişkisini içermektedir. Sıralama için örnek verilen referans alternatiflerden üretilen karar kuralları ile tercih modeli oluşturulmaktadır. Her bir "eğer … öyleyse …" karar kuralı, baskınlık ilişkisine göre alternatiflerin karşılaştırılması

sonucu elde edilen kısmi kriter profili alt kümelerini ifade eder. Karar kuralları karar vericinin sıralama örneklerinin dilini konuştuğundan doğal ve kolay bir çıkarımı vardır.

Yukarıda ifade edilen problem, klasik sıralama problemidir. Literatürde klasik çok kriterli sıralama üzerine yapılmış çalışmalara rastlamak mümkündür. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Örüntü tanıma alanında yapılmış bir sınıflandırma uygulaması olarak otomobiller çeşitli kriterler açısından ele alınmıştır [1]. İki karma tamsayılı programlama modeli ile 0-1 tatmin modellerinin sınıflandırma performansları nesne, kriter ve sınıf sayısının değiştiği 64 örnek problemi çözme becerileri üzerinden değerlendirilmiştir.

Sınıflandırma problemlerinin gözlendiği bir diğer uygulama alanı ise insan kaynakları yönetimidir. Bilişim teknolojisi takımında çalışanların işbirliği değerlendirmesi üzerine yapılmış bir uygulamada yedili Likert ölçeği ile dört kriter açısından dört çalışanın düşük, orta ve yüksek işbirliği derecesi sınıflarına atanması için ELECTRE-TRI yöntemi kullanılmıştır [2]. Çalışanların performanslarına göre sınıflandırması için eklemeli fayda fonksiyonu ve üst derecelendirme temelli karma tamsayılı doğrusal programlama modelleri önerilmiştir [18]. On beş satış müdürünün üç kriter açısından dört sınıfa atanması için önerilen modellerden elde edilen sonuçlar kıyaslanarak model sonuçlarındaki farklılıkların sebepleri incelenmiştir.

Eğitim sınıflandırma uygulamalarının görüldüğü bir diğer alan olarak dikkat çekmektedir. MBA (Master of Business Administration) programlarının sınıflandırılması için üst derecelendirmeye dayalı bir tamsayılı programlama modeli önerilmiştir [19]. Çalışmada, otuz MBA programının sıralı beş sınıfa üç kriter temelinde yerleştirilmesi sınıflandırma kısıtlarının ihlalini en küçükleyecek şekilde sağlanmıştır. Başka bir çalışmada, yükseköğrenimde kurum bünyesinde çalışan araştırmacıların önemli bir tercih kriteri olduğu düşüncesinden hareketle bir araştırma direktörünün kurumundaki yirmi altı araştırmacıyı sınıflandırması problemi ele alınmıştır [20]. On iki kriterin ele alındığı Analitik Ağ Süreci temelli bir yaklaşımla araştırmacılar dört sınıfta sıralanmıştır. Eklemeli fayda fonksiyonu ve üst derecelendirme temelli sıralama modellerinin kullanıldığı eğitim alanında yapılmış bir diğer çalışmada ise, Ecole Centrale Paris okulunda Endüstri Mühendisliği çift ana dal eğitimi almak için başvuruda bulunan yetmiş altı öğrenciden ellisinin seçimi gerçekleştirilmiştir

[21]. Öğrenciler altı kriter temelinde değerlendirilerek başvurusu kabul edilen ve başvurusu reddedilen öğrenciler olarak sıralanmışlardır. Brezilya'da bir dil okuluna başlayan yirmi öğrenci, İngilizce becerilerini ölçen altı kriter dikkate alınarak ortalama altı, ortalama ve ileri düzey sınıflarına ayrılmışlardır [22]. Öğrencilerin sınıflandırılmasında ELECTRE-TRI yönteminden yararlanılmıştır.

Üretim alanında da sınıflandırma uygulamalarının gerçekleştirildiği gözlenmiştir. Stok politikalarının belirlenmesinde ürünlerin kategorilere ayrılmasının önemine değinen bir çalışmada [23], ELECTRE-TRI yöntemi yardımıyla stok yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Bir şirketin üretimde kullandığı elli ürünü, stok deposundaki A, B ve C alanlarından hangisine yerleştireceği talep, boyut, karlılık ve tüketici duyarlılığı kriterleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Nanomalzemelerin insan sağlığına ve çevreye zararlı etkileri sebebiyle risk düzeylerini belirlemeyi amaçlayan bir uygulamada [24], bir üreticinin ürettiği elli bir malzeme için on kriteri dikkate alarak her bir malzemenin beş farklı önlem düzeyinden hangisine uygun olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, sınıflandırma yaklaşımı olarak eklemeli fayda fonksiyonu kullanılmıştır. Bir şirketin yirmi tedarikçisini stratejik ortak, umut veren, rekabetçi ortaklık ve çalışılmayacak tedarikçiler olarak sınıflandırmaya çalıştığı bir uygulamada Stokastik Çok Kriterli Kabul Analizi (SMAA - Stochastic Multi-Criteria Acceptability Analysis) ve bulanık FlowSort yaklaşımları kullanılmıştır [25]. Eğitim alanında çift ana dal öğrencisi seçimi için yapılan uygulamada kullanılan modeller [21], aynı çalışmada ayrıca bir ulaşım şirketinin otobüslerinin tamir durumlarına göre dört sınıfa ayrılması için de kullanılmıştır.

Çevre ve enerji yönetimi alanında da sınıflandırma çalışmalarına rastlanmaktadır. İran'ın başkenti Tahran bünyesinde yer alan yirmi iki semtin hava kalitesine göre sınıflandırılması için İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralaması (TOPSIS - Technique For Order Preference By Similarity To An Ideal Solution) yöntemi temelli bir sıralama yaklaşımı önerilmiştir [26]. Beş kriterin dikkate alındığı çalışmada semtler üç sınıfta sıralanmıştır. Değişken Tutarlılık Baskınlığına Dayalı Kaba Küme yaklaşımının kullanıldığı bir çalışmada ise [27], alabalık havzalarının korunmasına yönelik bir risk değerlendirme uygulaması sunulmuştur. Fransa sınırlarında bulunan altmış dokuz alan beş kriter temelinde değerlendirilerek dört risk grubunda sıralanmıştır.

Sınıflandırma uygulamalarının yaygın olduğu bir diğer alan ise, finansal yönetim ve ekonomidir. TOPSIS yöntemi temelli bir sıralama yaklaşımı ile ülkelerin ekonomik bağımsızlık açısından sıralanması problemi ele alınmıştır [28]. Çalışmada, on iki kriter temelinde değerlendirilen yüz seksen ülke beş gruba ayrılarak ekonomik bağımsızlık düzeyleri belirlenmiştir. Küçük ve orta ölçekli işletmelerinin kredi risk değerlendirmesi için ELECTRE-TRI temelli bir yaklaşım önerilmiştir [3]. Yüz doksan dört işletme, finansal, büyüme, üretkenlik, yenilikçilik, takım kalitesi ve temel verileri içeren on iki kriter bakımından değerlendirilerek beş grupta sıralanmıştır. İnşaat sektöründen bir şirketin alt yüklenicilerine verilebilecek işleri sınıflandırması için yarı dengeleyici bir çok kriterli sıralama yaklaşımı önerilmiştir [29]. Brezilya'dan bir inşaat şirketi tarafından yürütülen on yedi faaliyet yedi kriter temelinde değerlendirilerek üç sınıfa ayrılacak şekilde gruplanmıştır. Özel bankacılıkta yatırımcılara karar desteği sağlamak için yatırım alternatifleri, yatırımcının riske yaklaşımı açısından bulanık TOPSIS yöntemi yardımı ile sınıflandırılmıştır [30]. TOPSIS yönteminden elde edilen sonuçlar, farklı risk gruplarına yatkın karar vericiler için çok amaçlı tamsayılı programlama yardımıyla portföy oluşturmak için kullanılmıştır. Başka bir çalışmada, çok kriterli hiyerarşi süreci ve eklemeli fayda fonksiyonu yaklaşımlarını birleştiren melez bir yaklaşımla bankaların performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir [4]. Altı ana kritere bağlı otuz bir kriter ile Yunan bankalarının beş yıllık bir dönemdeki performansı seksen beş nesne olarak ele alınarak beş performans grubunda sınıflandırılmıştır.

3. TERS ÇOK KRİTERLİ SIRALAMA PROBLEMİ

Ters Çok Kriterli Sıralama Problemi (TÇKSP), temel olarak farklı nesnelerin etkin ve etkin olmayan sınıflarına atanması ve etkin olmayan sınıftaki nesnelerin etkin sınıfa hangi değişiklikler olduğunda geçebileceği ile ilgilenen Veri Zarflama Analizi (VZA) tekniğine benzemektedir. TÇKSP, VZA tekniğinde ele alınan iki sınıflı problemin genelleştirilmiş bir hâli olarak düşünülebilir. TÇKSP ile teorik olarak sonsuz sayıda sınıf içeren problemleri modellemek mümkündür.

Problem başlangıcında, çeşitli kriterlere göre değerlendirilen nesneler önceden tanımlanmış ve aralarında tercih sırası bulunan sınıflara atanarak sıralanır. TÇKSP ile karar verici, nesne durumlarını değiştirecek etkileri olan önceden tanımlanmış bir eylem kümesinden bazı elemanları seçerek nesne puanlarını ve atandıkları sınıfları değiştirme olanağına sahip olur.

Problemi daha iyi anlamak için bir üniversitenin lisans öğrencileriyle ilgili örnek bir durum ele alınabilir. Öğrenciler birçok farklı ders almakta ve dönem sonunda her bir dersteki başarı durumları not ile değerlendirilmektedir. Bu problemde; öğrenciler nesne, dersler kriter, notlar ise kriterlerin değerlendirilmesidir. Üniversite “başarısız”, “başarılı” ve “yüksek başarılı” şeklinde 3 sıralı grup oluşturmuştur. Öğrenciler, derslerden aldıkları başarı notlarına göre bu sınıflardan birine atanmaktadırlar. Üniversite, öğrencilerin başarı düzeylerini yükseltmek (üst sınıfa geçmelerini sağlamak) için yeni dersler açmayı planlamakta ve ders açma maliyetini en düşük düzeyde tutmak istemektedir. Burada ifade edilen ders açma maliyetini minimize ederek öğrenci başarısının iyileştirilmesi problemi TÇKSP ile çözülmektedir [31].

Bir başka örnek uygulama olarak bir sistemin risk değerlendirmesini yapan bir risk yöneticisi düşünülebilir. Ele alınan sistemin birden fazla alt sistemden oluştuğu düşünülerek her bir alt sistem ile ilişkili riski değerlendirmek için nitel bir risk modeli oluşturulmuştur. Model, kriterlere ilişkin değerlendirmelere göre her bir alt sistemi "yüksek", "orta", "sınırlı", "sıfır güvenlik açığı" şeklindeki risk seviyelerinden birine atamaktadır. Risk yöneticisi sistem üzerinde güvenlik açığı hafifletme planı oluşturmayı amaçladığından bir veya birkaç alt sistem üzerinde önleyici eylemler yapma imkânı vardır. Bu eylemler, farklı kriterlere ilişkin alt sistem değerlendirmelerini etkileyecek ve risk düzeylerini iyileştirecektir. Bütçe kısıtı

altında sistemdeki hiçbir altyapının "yüksek risk" seviyesine tahsis edilemeyeceğini garanti edecek iyileştirici eylemleri bulmak TÇKSP ile çözülecek bir karar problemidir [30].

3.1. Literatür Taraması

TÇKSP üzerine mevcut literatürde yayınlanan oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan en eski tarihli olanı Özpeynirci vd. [32] Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği kongresinde 2015 yılında sunulmuş bir bildiri özeti olup problemin ilk sunulduğu çalışma olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmada, doğrusal sıralama fonksiyonu, eklemeli fayda fonksiyonu ve üst derecelendirme temelli sıralama durumları için en düşük maliyete göre seçilecek iyileştirme eylemlerini belirleyen ve bütçe kısıtlaması altında en iyi sıralamayı sağlayacak iyileştirme eylemlerini belirleyen modeller önerilmiştir. Parametrelerin kesin olarak bilindiği durum için ve parametrelerin olurlu değerlerini içeren gürbüz sürüm için rassal örnekler üzerinde deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. Bu çalışma, 2018 yılında Annals of Operations Research dergisinde yayınlanmıştır [31].

Nükleer enerji santrallerinin hayati etkilerini azaltmak için stokastik bir üst derecelendirme temelli TÇKSP modelleri önerilmiştir [33]. Çalışmada santral etkilerini en küçükleyecek eylemleri belirleyen, parametrelerin olası değerleri altında en kötü durum için gürbüz sonuçları elde etmeyi hedefleyen ve olasılıklı durumda beklenen etki düzeyini azaltmayı hedefleyen modeller tanıtılmış, ve bu modeller yardımıyla on sekiz nükleer santral on altı kriter temelinde dört gruba ayrıştırılmıştır.

Parametre değerleri kesin olarak bilinen TÇKSP'nde çok amaçlı optimizasyon bakış açısı önerilen iki amaçlı bir doğrusal programlama modeli ile literatüre sunulmuştur [34]. İyileştirme planı maliyeti ile karar vericinin sınıflandırma beklentisi amaç fonksiyonlarının dikkate alındığı çalışmada, Türkiye'de bulunan bir sitenin bina enerji verimi etiketlerinin iyileştirilmesi üzerine bir uygulama yapılmış, amaç fonksiyonları için belirlenen hedef değerlerden en az sapmayı veren çözüm hedef programlama tekniği yardımıyla bulunmuştur.

2020 yılında kabul alan konuyla alakalı bir başka çalışmada [35] ise, karar vericinin iyileştirme planı ile ilgili nesne sınıflandırması veya bütçe konusunda başlangıçta herhangi bir kısıtlaması bulunmadığı kabul edilmiştir. Çalışma, başlangıçta kısıtlamanın olmadığı

durum için problemin parametrelerinin belirli olduğu varsayımı altında çözümünü elde etmeyi sağlayan, iyileştirme planı maliyeti ve sınıflandırma sonuçları arasında ödünleşim arayan bir etkileşimli algoritma sunmaktadır.

Çok kriterli sıralama ve ters çok kriterli sıralama problemlerini tanıtmak için aşağıda sayısal bir örnek sunulmuştur:

Hastanelerin ödeneklerini belirlemek için Sağlık Bakanlığı hastaneleri performanslarına göre belirli sınıflara ayırmakta ve sınıflara göre ödenek düzeylerini belirlemektedir. Bu uygulama kapsamında sınıflandırma için dikkate alınan kriterlerin doktor sayısı, hemşire sayısı, yatak sayısı ve hastanede uygulanabilen tetkik sayısı olarak belirlendiği kabul edilebilir. Hastanelerin en iyiden en kötüye doğru A, B ve C olmak üzere 3 farklı sınıfta gruplandığını ve sınıflara ait üst sınırların Çizelge 3.1 ile verilen şekilde tanımlandığı varsayılsın.

Çizelge 3.1. Hastane sınıflarına ilişkin üst sınır değerler

Sınıf	Doktor Sayısı	Hemşire Sayısı	Yatak Sayısı	Uygulanabilen Tetkik Sayısı
C sınıfı hastaneler	10	25	100	50
B sınıfı hastaneler	25	60	250	100
A sınıfı hastaneler	50	100	500	200

Bu kriterlere ilişkin ağırlık değerleri sırasıyla 0,4; 0,2; 0,1 ve 0,3 olarak belirlenmiş olsun. Beş hastane için performans kriterleri bazında değerler Çizelge 3.2'de verilmiştir:

Çizelge 3.2. Hastanelerin performans değerleri

Hastane	Doktor Sayısı	Hemşire Sayısı	Yatak Sayısı	Uygulanabilen Tetkik Sayısı
Hastane 1	8	12	160	20
Hastane 2	15	20	80	65
Hastane 3	30	70	200	120
Hastane 4	18	35	150	80
Hastane 5	35	40	150	110

Performans değerleri yukarıda verilen beş hastanenin yukarıda verilen sınıflandırma kuralları ve ağırlık değerleri dikkate alındığında atanacakları sınıflar, ikinci bölümde tanımlanan doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ve eklemeli fayda fonksiyonu yöntemlerine göre belirlensin.

Ayrıştırma fonksiyonuna göre; sınıf üst sınırları için hesaplamalar yapıldığında sınıflandırma kuralları Eş. 3.1'de verilen şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} U(a_i) &\le 34 \rightarrow a_i \in C \\ 34 < U(a_i) &\le 77 \rightarrow a_i \in B \\ 77 < U(a_i) &\rightarrow a_i \in A \end{aligned} \tag{3.1}$$

Hastanelerin performans puanları ise Eş. 3.2 – Eş. 3.6'da sunulduğu gibi hesaplanabilir:

$$U(a_1) = 0,4*8 + 0,2*12 + 0,1*160 + 0,3*20 = 27,6 \tag{3.2}$$

$$U(a_2) = 0,4*15 + 0,2*20 + 0,1*80 + 0,3*65 = 37,5 \tag{3.3}$$

$$U(a_3) = 0,4*30 + 0,2*70 + 0,1*200 + 0,3*120 = 82 \tag{3.4}$$

$$U(a_4) = 0,4*18 + 0,2*35 + 0,1*150 + 0,3*80 = 53,2 \tag{3.5}$$

$$U(a_5) = 0,4*35 + 0,2*40 + 0,1*150 + 0,3*110 = 70 \tag{3.6}$$

Sınıf kuralları ve hastane performans puanlarına bakıldığında Hastane 1 C sınıfına; Hastane 2, Hastane 4 ve Hastane 5 B sınıfına atanırken, Hastane 3 A sınıfına atanmaktadır.

Eklemeli fayda fonksiyonuna göre sınıfları belirlemek için sınıfların birim fayda değerleri Çizelge 3.3 ile verilen şekilde olsun.

Çizelge 3.3. Sınıflara göre kriterlerin birim fayda değerleri

Sınıf	Doktor Sayısı	Hemşire Sayısı	Yatak Sayısı	Uygulanabilen Tetkik Sayısı
C sınıfı hastaneler	0,10	0,05	0,01	0,05
B sınıfı hastaneler	0,12	0,07	0,03	0,10
A sınıfı hastaneler	0,18	0,08	0,06	0,15

Bu değerlere göre sınıflandırma kuralları Eş. 3.7 ile verildiği şekildedir:

$$\begin{aligned} U(a_i) &\le 0,21 \rightarrow a_i \in C \\ 0,21 < U(a_i) &\le 0,53 \rightarrow a_i \in B \\ 0,53 < U(a_i) &\rightarrow a_i \in A \end{aligned} \tag{3.7}$$

Eklemeli fayda fonksiyonuna göre sınıflandırma için hastanelerin toplam fayda değerleri Eş. 3.8 – Eş. 3.12'da gösterildiği gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} U(a_1) &= 0,1 * \frac{8-0}{10-0} + 0,05 * \frac{12-0}{25-0} + 0,01 + 0,03 * \frac{160-100}{250-100} + 0,05 * \frac{20-0}{50-0} \\ &= 0,08 + 0,024 + 0,022 + 0,02 = 0,148 \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned} U(a_2) &= 0,1 + 0,12 * \frac{15-10}{25-10} + 0,05 * \frac{20-0}{25-0} + 0,01 * \frac{80-0}{100-0} + 0,05 \\ &\quad + 0,10 * \frac{65-50}{100-50} = 0,14 + 0,04 + 0,008 + 0,08 = 0,268 \end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned} U(a_3) &= 0,10 + 0,12 + 0,18 * \frac{30-25}{50-25} + 0,05 + 0,07 + 0,08 * \frac{70-60}{100-60} + 0,01 \\ &\quad + 0,03 * \frac{200-100}{250-100} + 0,05 + 0,10 + 0,15 * \frac{120-100}{200-100} \\ &= 0,256 + 0,14 + 0,03 + 0,18 = 0,606 \end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned} U(a_4) &= 0,10 + 0,12 * \frac{18-10}{25-10} + 0,05 + 0,07 * \frac{35-25}{60-25} + 0,01 + 0,03 * \frac{150-100}{250-100} \\ &\quad + 0,05 * \frac{80-0}{100-0} = 0,164 + 0,07 + 0,02 + 0,04 = 0,294 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned} U(a_5) &= 0,10 + 0,12 + 0,18 * \frac{35-25}{50-25} + 0,05 + 0,07 * \frac{40-25}{60-25} + 0,01 \\ &\quad + 0,03 * \frac{150-100}{250-100} + 0,05 + 0,10 + 0,15 * \frac{80-0}{100-0} \\ &= 0,292 + 0,08 + 0,02 + 0,165 = 0,557 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Yapılan fayda değeri hesabı sonucunda fayda değeri 0,21'den düşük olan Hastane 1, C sınıfı olarak belirlenir. C sınıfına atanmayan hastanelerden fayda değeri 0,53 ve altında olan Hastane 2 ve Hastane 4, B sınıfına atanır. Fayda değeri 0,53'den yüksek olan Hastane 3 ve Hastane 5 de A sınıfı olarak belirlenir.

TÇKSP ise, sınıflara yapılan nesne atamalarını istenen duruma getirebilmek için nesne performanslarını değiştirecek eylemleri seçmeye çalışır. Yukarıda verilen örnek uygulama için, olası eylemler olarak yeni doktor ve yeni hemşire istihdam edilmesi, hastaneye yatak ilave edilmesi, hastanede uygulanabilecek yeni tetkiklerin eklenmesi gibi işlemlerin söz konusu olduğu kabul edilsin. Bu eylemlerin her biri için katlanılacak maliyetler olsun. C sınıfı olan Hastane 1'in B sınıfına, B sınıfı olan Hastane 4'ün A sınıfına yükselebilmesi ve diğer hastanelerin durumlarını koruyabilmesi için en düşük maliyetle hangi eylemlerin seçilmesi gerektiğini belirlemek veya belirli bir bütçe kısıtı konulduğunda 5 hastanenin en iyi sınıflara atanabileceği sınıflandırma durumunu belirlemek TÇKSP'nin konusudur.

4. BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA

Bulanık küme teorisi, Zadeh tarafından [36], belirsiz veya kararsız terimleri ifade edebilmek için tanımlanmıştır. Belirsiz verileri ifade edebilme kabiliyeti bulanık küme teorisinin temel avantajıdır [37]. Klasik kümelerdeki kümeye ait olma veya olmama durumuna karşın bulanık kümelerde elemanın kümeye aidiyeti üyelik fonksiyonları yardımıyla ifade edilir. Bir bulanık küme, küme sembolünün üzerine konulan uzatma işareti '~' ile ifade edilir.

Matematiksel programlamanın ortaya çıkışı, Von Neumann ve Morgenstern'in 1953 yılında yayınlanan Theory of Games and Economic Behavior isimli çalışmasına ile George B. Dantzig'in 1947 yılında Simpleks Metodunu keşfetmesine dayandırılmaktadır [38]. Zaman içinde kapsamı genişleyen matematiksel programlama kavramı, günümüzde doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama, tamsayılı programlama, konveks programlama, dinamik programlama ve belirsizlik altında programlama gibi birçok tekniği içine alan genel bir terim haline gelmiştir [39]. Bu tez çalışmasında önerilen doğrusal programlama modellerindeki bazı parametrelerin bulanık belirsizlik içermesinden ötürü, bu bölümde bulanık doğrusal programlama konusu tanıtılmıştır.

c karar değişkenlerinin amaç fonksiyonu katsayı vektörünü; *b*, *m* tane kısıt için kaynak miktarı sınırlarını ifade eden kaynak vektörünü; *x*, karar değişkenlerini ifade eden değişken vektörünü ve *A* da kısıt katsayılarını içeren kısıt katsayı matrisini ifade etmek üzere doğrusal programlama modelinin sembolik gösterimi Eş. 4.1 ile gösterildiği gibidir:

$$
\begin{aligned}
& c, x \in R^n ; b \in R^m ; A \in R^{mxn} \\
& enb\, z = f(c, x) = cx \\
& \qquad g(a, x) = Ax \le b \\
& \qquad\qquad x \ge 0
\end{aligned}
\tag{4.1}
$$

A, *b* ve *c* vektörleri ile ifade edilen problem parametreleri genellikle zaman içerisinde değişen durumlardan etkilenebilmekte, bu nedenle de karar verici çoğunlukla parametre değerlerini sağlıklı ve tam bir biçimde bulamamaktadır. Bu durumlarda kısıt katsayıları, kaynak miktarları ve amaç fonksiyonu katsayılarını tanımlamak için bulanık değerler kullanılabilir. Bulanık sayıları formüle etmek için, üyelik fonksiyonları kullanılabilir. Eğer bir karar probleminde *A*, *b* ve/veya *c* vektörü ile tanımlanan değerler bulanık ise, bu tür

parametre değerlerine sahip doğrusal programlama modelleri bulanık doğrusal programlama modelleri olarak adlandırılır [40].

Bir doğrusal programlama probleminin elemanları için olası bulanık durumlar Çizelge 4.1'de gösterilmiştir [8]:

Çizelge 4.1. Doğrusal programlama problemlerinde olası bulanık durumlar

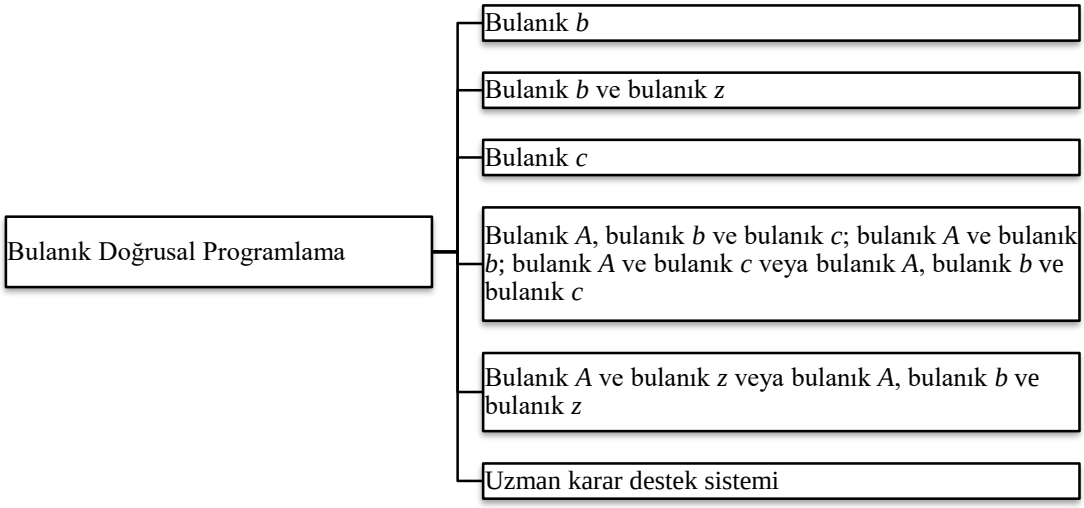
Amaç Fonksiyonu	enb / enk $z = cx$	Bulanık z	Bulanık c
Kısıtlar	Ax $\{\leq, =, \geq\}$ b	Bulanık b veya $\{\leq, =, \geq\}$	Bulanık A

Bulanık doğrusal programlama modelleri üzerine ilk sınıflandırma, Zimmermann tarafından simetrik ve simetrik olmayan modeller sınıflarına ayrıştırılarak yapılmıştır [8]. Bulanık doğrusal programlama modelleri daha sonra Leung tarafından, aşağıdaki dört sınıfta gruplanmıştır [41]:

1. Amaçları kesin ve kısıtları bulanık modeller,
2. Amaçları bulanık ve kısıtları kesin modeller,
3. Amaçları ve kısıtları bulanık modeller,
4. Sağlam (robust) programlama.

Bir başka gruplama çalışmasında, Luhandjula tarafından bulanık matematiksel programlama; esnek programlama, bulanık parametreli matematiksel programlama ve bulanık stokastik programlama olarak üç grupta ifade edilmiştir [42].

Lai ve Hwang, bulanık doğrusal programlamayı problem parametrelerini ifade eden *A, b, c* ve/veya *z*'nin olası bulanık kombinasyonlarına bağlı olarak altı ana problem tipi olarak tanımlamışlardır [8]. Bulanık doğrusal programlama problem tipleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bulanık doğrusal programlama türleri

Bulanık sayıların uygulamalarına yönelik son bir yılda yapılan güncel çalışmalar Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Bulanık sayıların uygulama alanları

Yazar	Yöntem	Uygulama Alanı
Prasad vd. [43]	Bulanık AHP (Analytic Hierarchy Process), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions)	Magnezyum alaşımları için kaplama malzemesi belirlenmesi
Galankashi vd. [44]	Bulanık AHP	Portföy seçimi
Narayanamoorthy vd. [45]	HF-SOWIA (Hesitant Fuzzy Subjective and Objective Weight Integrated Approach) ve HF-MOOSRA (Hesitant Fuzzy Multi-Objective Optimization on the basis of Simple Ratio Analysis)	Biyo-tıbbi atık yönetimi
Ramirez-Atencia vd. [46]	Bulanık AHP, Bulanık VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), Bulanık TOPSIS, Bulanık TOPSISVector, Bulanık TOPSISLinear, Bulanık MultiMOORA (The Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis), Bulanık WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yöntemleri değerlendirilmiş ve Fuzzy VIKOR seçilmiştir.	İnsansız hava araçları için karar destek sistemi
Majumder vd. [47]	Bulanık AHP, Bulanık ANP (Analytic Network Process), TOPSIS-1, Grup Veri İşleme Yöntemi	COVID-19 için en önemli risk faktörünün belirlenmesi

Çizelge 4.2. (devam) Bulanık sayıların uygulama alanları

Salih vd. [48]	FDOSM (Fuzzy Decision by Opinion Score Method)	Haberleşme ve spor alanında vaka çalışmaları
Sharma vd. [49]	TISM (Total Interpretative Structural Modeling) yaklaşımı, Bulanık MICMAC (Matriced'Impacts Croisés Multiplication Appliquéan Classement) ve DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)	Akıllı şehirler için atık yönetimi
Mahdiyar vd. [50]	FDM (Fuzzy Delphi Method) ve FBWM (Fuzzy Best-Worst Method)	Yeşil çatı sistemlerinin önündeki engellerin önceliklendirilmesi
Wang vd. [51]	Bulanık DEMATEL, FOWA (Fuzzy Ordered Weighted Averaging), Bulanık MULTIMOORA.	Pil değiştirme istasyonu yer seçimi
Madhu vd. [52]	Bulanık AHP, TOPSIS, VIKOR, EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution), PROMETHEE-II (The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), Digraph ve matrix yaklaşımı	Biyoyağ dönüşümü için en uygun biyokütle malzemesinin seçimi
Avikal vd. [53]	Bulanık AHP ve TOPSIS	Kırsal bölgelerdeki telekom kuleleri için en iyi güç ünitesi kaynağının seçimi
Nyimbili ve Erden [54]	Bulanık AHP, BWM (Best-Worst Method) , GIS (Geographic Information Systems)	İtfaiye istasyonu yer seçimi
Afolayan vd. [55]	Geri Bildirim Entegre Bulanık AHP	İnşaat yüklenicisi karar kriteri değerlendirme
Agarwal ve Kansal [56]	Bulanık TOPSIS	Hidroelektrik projesi maliyet tahmini
Hameed vd. [57]	Modified-SIRA (Modified-Safety Improve Risk Assessment), TRPN (Total Risk Priority Number), Bulanık VIKOR.	Pakistan için elektronik atığın ülkeye nasıl ulaştığının, endüstriyel riskinin ve nüfusa etkisinin değerlendirilmesi
Karuppiah vd. [58]	Delphi Yöntemi, Bulanık DEMATEL, Bulanık ANP ve Bulanık TOPSIS	Küçük-orta büyüklükteki işletmeler için yeşil üretimin önündeki engellerin analizi ve sıralanması
Wu vd. [59]	Bulanık DEMATEL, Bulanık TODIM (Portekizce'de etkileşimli ve çok kriterli karar vermenin kısaltması)	Fotovoltaik güç birleştirme hidrojen depolama projesi yatırım kararı
Şahin [60]	FAHP, ELECTRE (Elemination and Choice Translating Reality English), VIKOR, TOPSIS, PROMETHEE, WSM (Weighted Sum Model)	Denizaşırı üretim için 25 alternatif ülkenin değerlendirilmesi
Rouyendegh vd. [61]	IF-TOPSIS (Intuitionistic Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), Veri zarflama analizi	Perakende sektörü için performans değerlendirmesi

Çizelge 4.2. (devam) Bulanık sayıların uygulama alanları

Roozbajani vd. [62]	COPRAS (Complex Proportional Assessment), AHP, DEMATEL, ve Shannon Entropi yötemlerinin deterministik, bulanık ve gri versiyonları, Borda sayım yöntemi	Havzalar arası su transferi projelerinin değerlendirilmesi
Budak vd. [63]	Aralık değerli sezgisel bulanık DEMATEL, Aralık değerli sezgisel bulanık ANP, TOPSIS	Gerçek zamanlı konum sistemlerinin performans kriterlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında geliştirilen modellerde, kısıt katsayılarında (A) ve kısıt kaynak vektöründe (b) bulanık belirsiz olması durumu ile sadece kısıt kaynak vektörünün (b) bulanık belirsiz olması durumları göz önünde bulundurulmuştur. A ve b parametrelerinin bulanık olduğu problemlerin çözümünde Carlsson ve Korhonen tarafından geliştirilen çözüm yaklaşımı [64], sadece b değerlerinin bulanık olduğu problemlerin çözümünde ise Vergeday tarafından geliştirilen çözüm yaklaşımı [65] kullanılmıştır. Parametreleri bulanık değerler içeren doğrusal programlama problemlerinin çözümü için kullanılan çözüm yaklaşımlarına Kocadağlı tarafından yapılan incelemeden [8] ulaşılabilir.

4.1. Carlsson ve Korhonen'in Bulanık Çözüm Yaklaşımı

Bazı doğrusal programlama problemlerinde, problemin tüm katsayıları belirsiz olabilir. Bu tip problemlerin formülasyonu Eş. 4.2'deki gibidir:

$$\begin{aligned} &enb\, z = f(c,x) = \tilde{c}\,x \\ &g_i(x) = \left(\tilde{A}x\right)_i \le \tilde{b}_i \qquad ,i = 1,2,\ldots,m \\ &\qquad x \ge 0 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Carlsson ve Korhonen [64], Eş. 4.2'de verilen problemin çözümü için ödünleşim yaklaşımını önermiştir. Bu yaklaşımı açıklamak için aşağıda bir örnek verilmiştir.

Amaç fonksiyonunu katsayıları için tanımlanan üyelik fonksiyonları $\mu_1 = 1-\theta_1$ ve kısıtlar için tanımlı üyelik fonksiyonları $\mu_i > 1-\theta_1 \left(i = 2,3,\ldots,m\right)$ kabul edildiğinde, üyelik

fonksiyonu değerlerinin kesişimi en küçük değer olan $\mu_c = 1-\theta_1$ olarak belirlenir. Daha yüksek bir üyelik değerine sahip bir çözüme ulaşmak için $\theta_2 < \theta_1$ ve $\mu_i > 1-\theta_2 \left(i = 3,4,\ldots,m\right)$ koşullarını sağlayan bir θ_2 değeri seçildiğinde, $1-\theta_2 > 1-\theta_1$ olacağından memnuniyet derecesi daha yüksek bir çözüm elde edilir. Bu çözümün üyelik değeri μ_D, Eş. 4.3 ile gösterilmiştir.

$$\mu_D = \mu_0 = \mu_1 = \mu_2 = \ldots = \mu_m = 1-\theta_2 \tag{4.3}$$

İşlemler devam ettirildiğinde, $1-\theta_i$ değerleri $1-\theta_2$ ile değiştirilir ve daha yüksek μ_i değerlerine imkân sağlanabilir.

Problemin çözümüne başlamadan önce, doğrusal programlama probleminin bulanık olmayan halinin en iyi çözümü $z^* = z^*\left(c, A, b\right)$'yi elde etmek için *c*, *A* ve *b* parametrelerinin artan aralıklar hâldeki tanım aralıklarını belirlemek gerekir. Bu düşünceyle, her bir parametrenin olası değerleri için $\left[c_0, c_1\right)$, $\left[A_0, A_1\right)$ ve $\left[b_0, b_1\right)$ aralıkları tespit edilir. Bu aralıklarda alt sınır değerleri, kesin olarak çözümün elde edileceği, risksiz değerleri göstermektedir. Aralıkların üst sınır değerleri ise, gerçeğe uzak veya olası görülmeyen değerleri ifade etmekte olup bu değerlerle bulunan çözüm olabilirlikten uzak çözümlere karşılık gelir. Risksiz değerlerden olası görülmeyen parametre değerlerine ilerlendiğinde, güvenli çözümlerden iyimser çözümlere doğru gidilir. Bu ilerleme ile memnuniyet derecesi daha yüksek olan çözümler, düşük memnuniyet dereceli çözümlere karşı tercih edilmiş olur. Optimum parametre değerleri, aralıklar için belirlenen tercih fonksiyonları kullanılarak tespit edilebilir.

Carlsson ve Korhonen, geliştirdikleri yaklaşımda problemin herhangi bir çözümü ile problemin parametre değerleri arasındaki ilişkiyi dikkate almışlardır. Elde edilen çözüm *z**, *c*, *A* ve *b* değerlerinin artan bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, *c*, *A* ve *b* değerleri için monoton azalan üyelik fonksiyonları tanımlanabilir. Doğrusal, parçalı doğrusal, hiperbolik üstel fonksiyonlar monoton azalan üyelik fonksiyonu olarak kullanmaya uygundur. Diğer yandan, amaç fonksiyonu için üyelik fonksiyonu genellikle azalmayan bir fonksiyon olarak belirlenir.

c, *A* ve *b* parametreleri arasında yapılacak değiştirmelerden sonra, çözümün üyelik değeri Eş. 4.4 ile verildiği şekilde olur.

$$\mu = \mu_c = \mu_A = \mu_b \tag{4.4}$$

Üyelik fonksiyonlarının 0 ile 1 arasında değerler almasından ötürü g_c, G_A ve g_b fonksiyonları sırasıyla μ_c, μ_A ve μ_b fonksiyonlarının ters fonksiyonları kabul edildiğinde, *c*, *A* ve *b* parametre değerleri için aşağıda Eş. 4.5 ile verilen dönüşümler yapılabilir.

$$c = g_c(\mu),\ A = G_A(\mu) \text{ ve } b = g_b(\mu) \tag{4.5}$$

Bu dönüşüm ifadelerinin doğrusal programlama modelinde kullanılması ile problemin modeli Eş. 4.6 ile verilen hâle gelir.

$$\begin{aligned} enb\, z = f(c,x) &= g_c(\mu)\,x \\ \left[G_A(\mu)\right]x &\le g_b(\mu) \\ x &\ge 0 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Eş. 4.5 ile ifade edilen matematiksel modelde hem μ, hem de *x* değerleri bilinmediğinden modelin doğrusal olmadığı açıktır. Buna karşın, μ değerleri verildiği veya belirlenebildiği durumda, modeli doğrusal programlama çözüm yöntemlerinden birini kullanarak çözmek mümkündür. Böylece her bir μ değeri ile elde edilen çözümler listesi oluşturulabilir. Bu listede herhangi bir μ değeri için elde edilen çözüm değeri, (z^*, μ) şeklinde nokta çiftleri olarak gösterilebilir. Karar vericiler, bu listeden katlanabilecekleri belirsizlik düzeyine göre uygun bir çözümü uygulamak üzere seçebilir.

Çözüm yaklaşımını anlamak için bir fabrikadaki üretim çizelgeleme problemi örneği ele alınabilir. Deri ürünleri üretilen bu fabrikada yarma, soyma, dikme ve cilalama olmak üzere dört işlem merkezinden oluşan bir üretim süreci uygulanmaktadır. İşlem merkezlerinin adam saat cinsinden kapasiteleri için bulanık belirsiz değerler; yarma işlem merkezi için [18, 22), soyma işlem merkezi için [10, 40), dikme işlem merkezinde [96, 110) ve cilalama işlem merkezinde [96, 110) olarak tahmin edilmiştir. x_1 ürün-1'in üretim miktarını, x_2 ürün-2'nin

üretim miktarını ve x_3 ürün-3'ün üretim miktarını ifade ederken model, bu ürünlerden üretilecek miktar sayısını optimize etmektedir. Ayrıca amaç fonksiyonu katsayıları ve kısıt katsayıları da kesin olarak bilinemediğinden bulanık değerlerle ifade edilmiş ve Eş. 4.7 ile verilen matematiksel model oluşturulmuştur:

$$\begin{aligned} enb\,&[1,1.5)\,x_1 + [1,3)\,x_2 + [2,2.2)\,x_3 \\ &[3,2)\,x_1 + [2,0)\,x_2 + [3,1.5)\,x_3 \le [18,22) \\ &[1,0.5)\,x_1 + [2,1)\,x_2 + [1,0)\,x_3 \le [10,40) \\ &[9,6)\,x_1 + [20,18)\,x_2 + [7,3)\,x_3 \le [96,110) \\ &[7,6.5)\,x_1 + [20,15)\,x_2 + [9,8)\,x_3 \le [96,110) \\ &x_1, \quad x_2, \quad x_3 \ge 0 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Problem parametrelerine ait üyelik fonksiyonlarının kısıt katsayıları için Eş. 4.8'de, kısıt kaynak vektörü için Eş. 4.9'da ve amaç fonksiyonu katsayıları için Eş. 4.10'da verildiği gibi olduğunu varsayalım:

$$\mu_{a_{ij}} = \frac{a_{ij} - a_{ij}^1}{a_{ij}^0 - a_{ij}^1} \tag{4.8}$$

$$\mu_{b_i} = \frac{1 - e^{-0,8\frac{b_i - b_i^1}{b_i^0 - b_i^1}}}{1 - e^{-0,8}} \tag{4.9}$$

$$\mu_{c_j} = \frac{1 - e^{3\frac{c_j - c_j^1}{c_j^0 - c_j^1}}}{1 - e^{3}} \tag{4.10}$$

Eş. 4.9'daki –0,8 ve Eş. 4.10'daki 3 katsayıları karar verici tarafından belirlemiş olup; negatif değer kullanımı konkav bir üssel fonksiyon, pozitif değer ise konveks bir üssel fonksiyon tercih edildiğini göstermektedir. Bir sonraki adımda, parametre değerlerinin üyelik derecesine bağlı olarak hesaplanması bulanık sayılar arasındaki mutlak ödünleşim varsayımı altında Eş. 4.11, Eş. 4.12 ve Eş. 4.13'de gösterilen şekilde gerçekleştirilmiştir:

$$a_{ij} = a_{ij}^1 + \mu\left(a_{ij}^0 - a_{ij}^1\right) \tag{4.11}$$

$$b_i = b_i - (1 - 0,8)\ln\left\{1 - \mu_{b_i}\left[1 - e^{-0,8}\right]\right\}\left(b_i^0 - b_i^1\right) \tag{4.12}$$

$$c_j = c_j + (1/3)\ln\left\{1-\mu_{c_j}\left[1-e^3\right]\right\}\left(c_j^0 - c_j^1\right) \tag{4.13}$$

Bu eşitliklerin kullanımı ile yapılan dönüşümler neticesinde problemin bulanık doğrusal programlama modeli Eş. 4.14'de ifade edilen modele denk olur:

$$\begin{aligned} & enb\left[1,5-0,167\ln(1+19,1\mu)\right]x_1+\left[3-0,667\ln(1+19,1\mu)\right]x_2+\left[2,2-0,067\ln(1+19,1\mu)\right]x_3 \\ & (2+\mu) \quad x_1+(2\mu) \quad x_2+(1,5+1,5\mu)x_3 \le 22+5\ln(1-0,55\mu) \\ & (0.5+0.5\mu)x_1+(1+\mu) \quad x_2+(\mu) \quad x_3 \le 40+37.5\ln(1-0,55\mu) \\ & (6+3\mu) \quad x_1+(18+2\mu)x_2+(3+4\mu) \quad x_3 \le 110+17.5\ln(1-0.55\mu) \\ & (6,5+0,5\mu)x_1+(15+5\mu)x_2+(8+\mu) \quad x_3 \le 110+17.5\ln(1-0,55\mu) \\ & x_1, \quad x_2, \quad x_3 \ge 0, \quad \mu \in [0,1] \end{aligned} \tag{4.14}$$

Eş. 4.14 ile ifade edilen matematiksel model karar değişkenlerinin çarpımını içeren eşitlikler içerdiğinden bir doğrusal olmayan programlama modelidir. Bu modelin doğrusal programlama teknikleri ile çözülmesi mümkün değildir. Doğrusal programlama teknikleri ile çözülebilmesi için μ değerinin önceden belirlenmesi gerekir. Yani, μ için belirlenecek her bir değer için optimum bir çözüm elde edebilmek mümkün olur. Bu yolla, *n* farklı μ değeri için yapılacak *n* sayıda denemeden elde edilecek optimum çözümler karar vericiye sunulabilir. Karar verici sunulan çözümler arasından hangisini uygulayacağına karar verebilir. Carlsson ve Korhonen'in çözüm yaklaşımıyla bulanık parametreli örnek matematiksel modelin çözüm sürecinin adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1: $\mu = 0$ noktasından başlanır, $n = 10$ deneme yapmak üzere $\delta = 0,1$ alınır.

Adım 2: $\mu = 0$ için oluşturulan aşağıda Eş. 4.15 ile verilen doğrusal programlama modeli çözülür.

$$\begin{aligned} & enb\ 1,5x_1+3x_2+2,2x_3 \\ & 2x_1+1,5x_3 \le 22 \\ & 0,5x_1+x_2 \le 40 \\ & 6x_1+18x_2+3x_3 \le 110 \\ & 6.5x_1+15x_2+8x_3 \le 110 \\ & x_1,\ x_2, x_3 \ge 0 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Bu modelin optimum çözümü, $x^*=(0, 0, 13,75)$ ve $z^*=30,25$'dir.

Adım 3: Adım 2'de elde edilen (μ, z^*) = (0, 30,25) çözümü çözüm tablosuna yazılır. Daha sonra, $\mu = \mu + 0{,}1$ alınır. Eğer $\mu > 1$ ise, Adım 4'e gidilir. Değilse, Adım 2'ye gidilerek $\mu = \mu + 0{,}1$ için oluşturulan doğrusal programlama modeli ile çözülür.

Adım 4: Çizelge 4.3 ile sunulan çözüm sonuçları her bir üyelik değeri için optimum kâr değerini, optimum karar değişkeni değerlerini ve kullanılan kaynak miktarlarını göstermektedir. Karar verici elde edilen sonuçları değerlendirerek önceden belirlenmiş bir belirsizlik düzeyinde uygulayacağı optimum çözümü seçebilir.

Çizelge 4.3. Carlsson ve Korhonen yaklaşımı ile örnek problemde elde edilen çözüm sonuçları

Üyelik Değeri	Amaç Fonksiyonu	Karar Değişkenleri	Kullanılan kaynak miktarı			
μ	z^*	x^*	b_1	b_2	b_3	b_4
0,0	30,25	(0, 0, 13,75)	19,90	0,00	39,80	110,00
0,1	28,35	(0, 0,17, 13,14)	21,70	1,50	47,70	109,10
0,2	26,02	(0, 0,73, 11,74)	21,40	3,10	58,00	108,00
0,3	23,76	(0, 1,22, 10,44)	21,10	4,70	66,50	106,80
0,4	21,60	(0, 1,64, 9,26)	20,80	6,00	73,40	105,70
0,5	19,55	(0, 1,99, 8,18)	20,40	7,10	78,70	104,40
0,6	17,62	(0, 2,29, 7,19)	20,00	8,00	82,80	103,10
0,7	15,80	(0, 2,53, 6,28)	19,60	8,70	85,50	101,40
0,8	14,24	(0, 0, 7,07)	19,10	5,70	43,80	62,20
0,9	13,08	(0, 0, 6,52)	18,80	5,90	43,00	58,00
1,0	12,00	(0, 0, 6)	18,00	6,00	42,00	54,00

Örneğin, karar verici için %30 belirsizlik kabul edilebilir varsayıldığında, üyelik değeri 0,7 olan çözümü seçecektir. Bu durumda optimum kâr değeri $z^* = 15{,}8$ karar değişkenlerinin değerleri ise $x^* = (0, 2{,}53, 6{,}28)$ olacaktır.

4.2. Vergeday'ın Bulanık Çözüm Yaklaşımı

Parametrik doğrusal programlama, doğrusal programlamanın kaynak vektörünün veya amaç fonksiyonu katsayılarının parametrelere bağlı olarak ifade edildiği ve parametre değerlerindeki değişimin problem sonuçlarındaki etkisini inceleyen bir alt konusudur [66]. Önceki bölümde anlatılan Carlsson ve Korhonen yönteminden farklı olarak bu çözüm

yaklaşımı sadece kaynak vektöründe bulanık parametreler içeren doğrusal programlama modelleri için uygun ve kullanışlı bir çözüm yöntemidir. Vergeday [65] kaynak vektörü bulanık belirsiz olduğu zaman, tüm kısıtları küçük eşit tipindeki kesin parametrik doğrusal programlama modeli ile bulanık doğrusal programlama modelinin birbirine denk olduğunu ispatlamıştır. Vergeday tarafından kaynak vektörü bulanık olan kısıtlar için üyelik fonksiyonu Eş. 4.16'da belirtildiği şekilde ifade edilmiştir.

$$\mu_i(x)=\begin{cases}1, & (Ax)_i < b_i \\ 1-\left[(Ax)_i - b_i\right]/\, p_i, & b_i \le (Ax)_i \le b_i + p_i \\ 0, & (Ax)_i > b_i + p_i\end{cases} \tag{4.16}$$

Eş. 4.16'da verilen üyelik fonksiyonuna göre aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

1. Eğer $(Ax)_i \le b_i$ ise, *i*. kısıt kesinlikle sağlanır, bu durumda $\mu_i(x)=1$ olur.
2. p_i, b_i'nin en fazla tolerans düzeyini gösterdiği zaman, $(Ax)_i = b_i + p_i$ durumu gerçekleşirse, ilgili kısıtın sağlanması mümkün değildir. Bu durumda $\mu_i(x)=0$ olur.
3. $(Ax)_i$, b_i ve $b_i + p_i$ değerleri arasında değerler aldığında üyelik fonksiyonları monoton azalandır. Diğer bir ifade ile, kaynak tüketimi arttığında karar vericiyi daha az düzeyde tatmin eden sonuçlar elde edilecektir.

Eş. 4.16'da verilen fonksiyonlar sürekli ve monoton fonksiyonlardır. Kısıtlar arasında ödünleşime izin verildiği zaman, bulanık doğrusal programlama modeli Eş. 4.17'de verilen modele denktir.

$$\begin{aligned} &enb\, cx \\ &x \in X_\alpha \end{aligned} \tag{4.17}$$

Bu modelde, $\alpha \in [0,1]$ aralığındaki her değer için $X_\alpha = \{x \mid \mu_i(x) \ge \alpha, \forall i, x \ge 0\}$ olur.

Üyelik fonksiyonu cinsinden kaynak vektörü yazıldığında, model Eş. 4.18'de ifade edilen hâle dönüşür.

$$
\begin{aligned}
&enb\, cx \\
&(Ax)_i \le b_i + (1-\alpha)\, p_i \qquad ,\forall i \\
&x \ge 0, \alpha \in [0,1]
\end{aligned}
\tag{4.18}
$$

Eş. 4.18'de verilen model, $\alpha = 1-\theta$ olduğu zaman, parametrik programlama modeline denktir. Başka bir ifadeyle, bulanık kısıtların üyelik fonksiyonlarının uygun biçimde olduğu varsayıldığında, bulanık kaynak vektörü içeren bulanık doğrusal programlama modeli, kesin parametrik doğrusal programlama modeli ile birbirine denk olur. Her bir α değerine karşılık gelen bir optimum sonuç vardır. Parametrik programlama modelinin, bulanık doğrusal programlamada kullanımı en yüksek kâr değerini sağlayacak üretim miktarlarını tespit etmek isteyen bir şirkete yönelik Eş. 4.19 ile matematiksel modeli verilen örnek bir uygulama üzerinde gösterilmiştir.

$$
\begin{aligned}
enb\, z = {} & 4x_1 + 5x_2 + 9x_3 + 11x_4 \\
& x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \le 15 \\
& 7x_1 + 5x_2 + 3x_3 + 2x_4 \le 120 \\
& 3x_1 + 5x_2 + 10x_3 + 15x_4 \le 100 \\
& x_1,\ x_2,\ x_3,\ x_4 \ge 0
\end{aligned}
\tag{4.19}
$$

Yukarıda verilen modelin Simpleks yöntemi ile çözümünden elde edilen optimum çözüm Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Örnek problemin kesin durum için optimum çözümü

Temel	x_1	x_2	x_3	x_4	s_1	s_2	s_3	STD
Z	0	3/7	0	11/7	13/7	0	5/7	695/7
x_1	1	5/7	0	-5/7	10/7	0	-1/7	50/7
s_2	0	-6/7	0	13/7	-61/7	1	4/7	325/7
x_3	0	2/7	1	12/7	-3/7	0	1/7	55/7

Çizelge 4.4'de verilen sonuçlarda optimum çözüm elde edilmesine karşın, birinci ve üçüncü kaynak miktarlarında belirsizlik vardır ve bu kaynaklar için sırasıyla 3 birim ve 20 birime kadar kaynak miktarının artırılabilmesi mümkündür. Bu kısıtlara ilişkin üyelik fonksiyonları doğrusal ve monoton azalan fonksiyonlar olduğu varsayılarak problemin matematiksel modeli aşağıda Eş. 4.20 ile verilen hâle dönüştürülmüştür:

$$
\begin{aligned}
enb\, z = {} & 4x_1 + 5x_2 + 9x_3 + 11x_4 \\
& x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \le 15 + 3(1-\alpha) \\
& 7x_1 + 5x_2 + 3x_3 + 2x_4 \le 120 \\
& 3x_1 + 5x_2 + 10x_3 + 15x_4 \le 100 + 20(1-\alpha) \\
& x_1, \quad x_2, \quad x_3, \quad x_4 \ge 0, \quad \alpha \in [0,1]
\end{aligned}
\tag{4.20}
$$

$\theta = 1-\alpha$ dönüşümü yapılarak, Eş. 4.21 ile verilen parametrik programlama modeli elde edilir.

$$
\begin{aligned}
enb\, z = {} & 4x_1 + 5x_2 + 9x_3 + 11x_4 \\
& x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \le 15 + 3\theta \\
& 7x_1 + 5x_2 + 3x_3 + 2x_4 \le 120 \\
& 3x_1 + 5x_2 + 10x_3 + 15x_4 \le 100 + 20\theta \\
& x_1, \quad x_2, \quad x_3, \quad x_4 \ge 0
\end{aligned}
\tag{4.21}
$$

Kesin durumdaki optimum çözüm dikkate alındığında, parametrik programlama yaklaşımı ile Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'de verilen sonuçlar elde edilir.

Çizelge 4.5. Parametrik programlama yaklaşımı ile elde edilen çözüm tablosu

Temel	x_1	x_2	x_3	x_4	s_1	s_2	s_3	STD
Z	0	3/7	0	11/7	13/7	0	5/7	695/7 + 139θ/7
x_1	1	5/7	0	-5/7	10/7	0	-1/7	50/7 + 10θ/7
s_2	0	-6/7	0	13/7	-61/7	1	4/7	325/7 + 103θ/7
x_3	0	2/7	1	12/7	-3/7	0	1/7	55/7 + 11θ/7

Çizelge 4.6. Parametrik programlama ile farklı üyelik değerleri için elde edilen çözüm sonuçları

Üyelik Değeri	Amaç Fonksiyonu Değeri	Kullanılan kaynak miktarı		
Θ	z^*	Kaynak 1	Kaynak 2	Kaynak 3
0,0	99,29	15,00	73,57	100,00
0,1	101,28	15,30	75,04	102,00
0,2	103,27	15,60	76,51	104,00
0,3	105,26	15,90	77,98	106,00
0,4	107,25	16,20	79,45	108,00
0,5	109,24	16,50	80,92	110,00
0,6	111,23	16,80	82,39	112,00
0,7	113,22	17,10	83,86	114,00
0,8	115,21	17,40	85,33	116,00
0,9	117,20	17,70	86,80	118,00
1,0	119,19	18,00	88,27	120,00

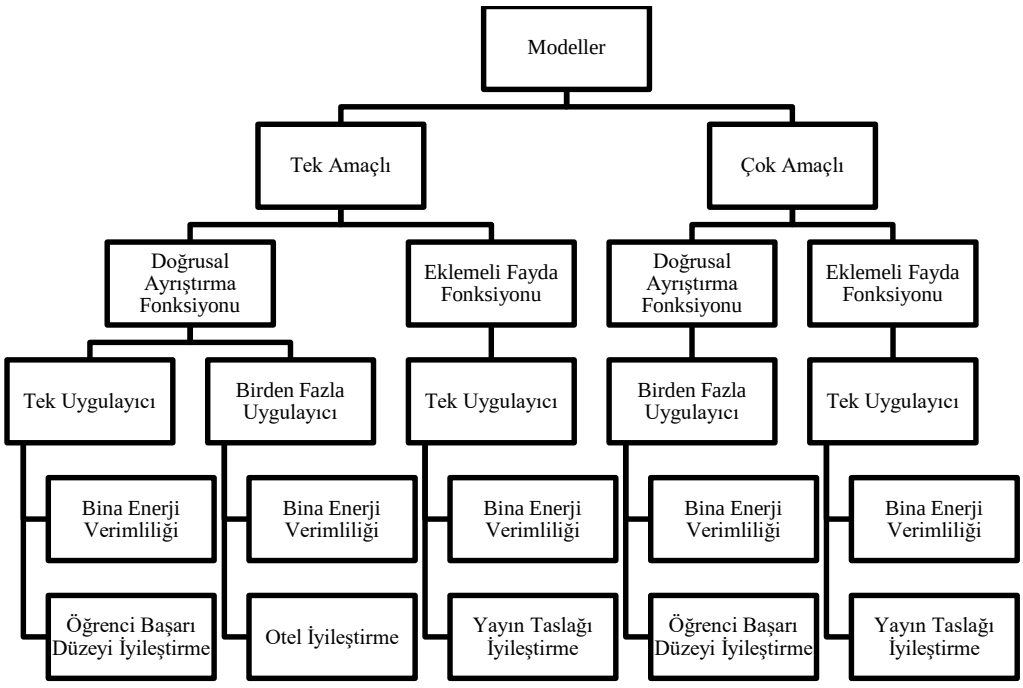
θ değerindeki artışa paralel olarak, optimum kâr değeri de kullanılan kaynak miktarları da artış göstermektedir. Buna karşın, kaynak kapasitelerinin artması, çözümlerin karar vericiyi tatmin etme düzeyini azaltmaktadır. Bu nedenle, karar verici kabul edilebilir tatmin düzeyini belirleyerek Çizelge 4.6 ile verilen çözümlerden birini seçerek elde edeceği kâr değerini belirleyebilir. Buradaki θ değerini Çizelge 4.5 ile verilen Simpleks tablosuna yazarak karar değişkeni değerlerini tespit edebilir.

Bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde beş model ikişer örnek problem üzerinden tanıtılacaktır. Farklı üyelik değerleri için modelin verdiği sonuçların doğruluğu kontrol edilmiş ve modelden elde edilen sonuçların olması beklenen sonuçlarla uyumlu olduğu doğrulanmıştır. Modellerle ilgili özet bilgi Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Model tipleri

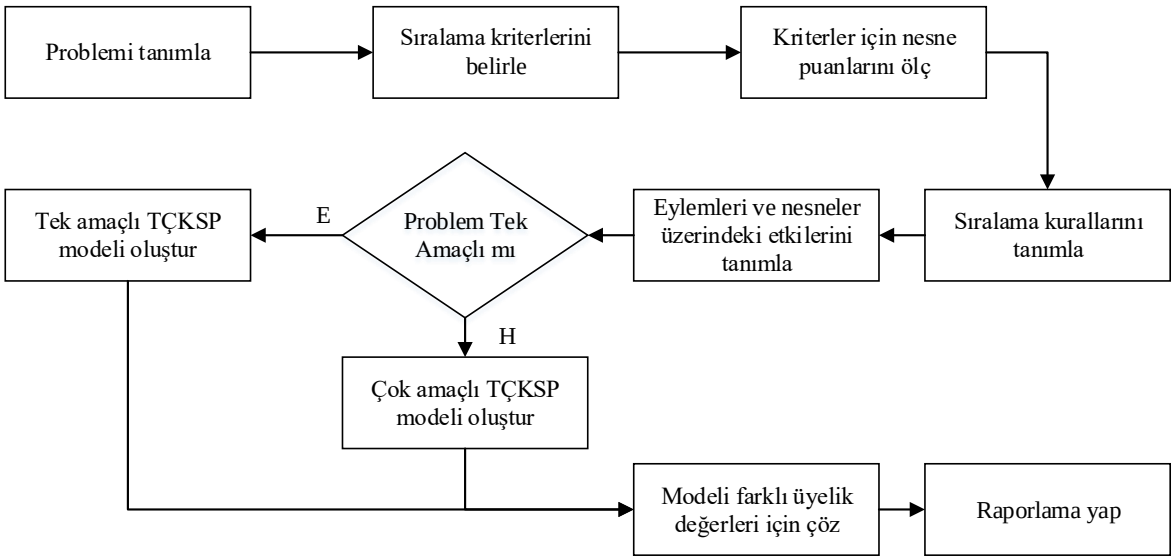
Model	Amaç Fonksiyonu Türü	Yöntem	Uygulama	Varsayım
1	Tek Amaçlı	Doğrusal Ayrıştırma Fonksiyonu ile Sıralama	Bina Enerji Verimliliği	Tek Uygulayıcı
			Öğrenci Başarı Düzeyi İyileştirme	Tek Uygulayıcı
2	Tek Amaçlı	Doğrusal Ayrıştırma Fonksiyonu ile Sıralama	Bina Enerji Verimliliği	Birden Fazla Uygulayıcı
			Otel İyileştirme	Birden Fazla Uygulayıcı
3	Tek Amaçlı	Eklemeli Fayda Fonksiyonuna Dayalı Sıralama	Bina Enerji Verimliliği	Tek Uygulayıcı
			Yayın Taslağı İyileştirme	Tek Uygulayıcı
4	İki Amaçlı	Doğrusal Ayrıştırma Fonksiyonu ile Sıralama	Bina Enerji Verimliliği	Birden Fazla Uygulayıcı
			Öğrenci Başarı Düzeyi İyileştirme	Birden Fazla Uygulayıcı
5	İki Amaçlı	Eklemeli Fayda Fonksiyonuna Dayalı Sıralama	Bina Enerji Verimliliği	Tek Uygulayıcı
			Yayın Taslağı İyileştirme	Tek Uygulayıcı

Tez çalışmasında önerilen modeller ağaç yapısı biçiminde Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Model tipleri

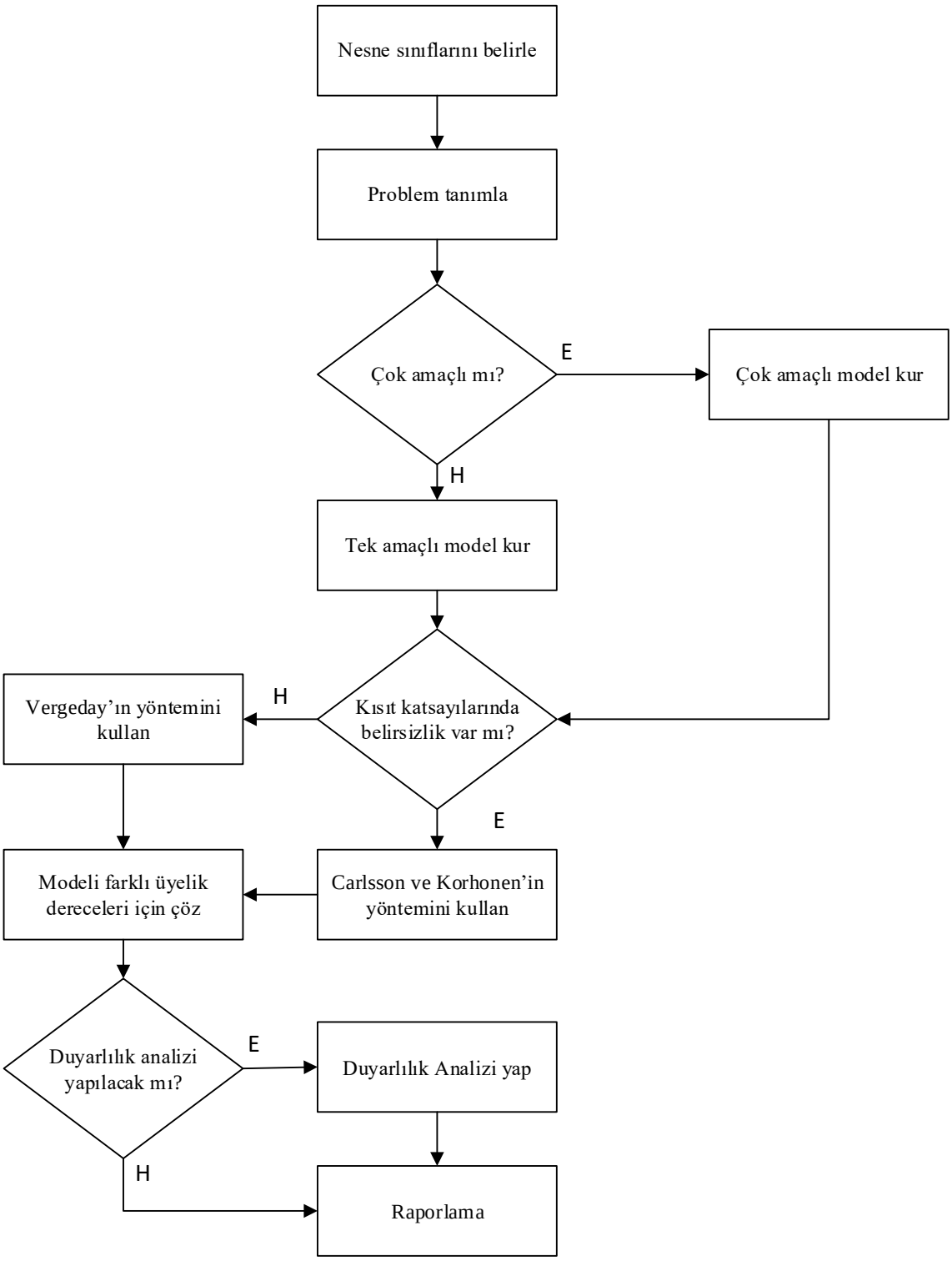
Bu tez çalışmasının temel amacı, karar vericileri sahip oldukları nesnelerle ilgili iyileştirme stratejileri belirlemeleri konusunda desteklemek için bir karar modeli geliştirmektir. Bu amaçla, problem parametrelerinin ifadesinde bulanık belirsizliğin varlığı göz önüne alınarak TÇKSP modeli genişletilmiştir. Önerilen model ile çözüm adımları Şekil 4.3'de verilmiştir:



Şekil 4.3. Bulanık parametreli TÇKSP'nin çözüm akış şeması

Problem çözüm sürecinde ilk adım problem tanımlamasıdır. Karar vericilerin; amaç(lar)ını, problem varsayımlarını, sınırlılıklarını, kısıtlamalarını ve sıralanacak nesneleri tanımlamaları gerekir. Daha sonra, nesneleri sıralamak için kullanılacak kriterler belirlenmelidir. Kriterler, nesnelerin sınıflandırılmasındaki etkili faktörler arasından seçilmeli ve tanımları açık olmalıdır. Kriter tanımlarından sonra, her bir kriter için her bir nesnenin performans puanları ölçülmelidir. Daha sonra, uygulama için sıralama kuralları tanımlanmalıdır. Sıralama kuralının tanımı, her sınıf için atama koşullarının ve performans puanlarının birleştirilme yolunun ifadesi anlamına gelir. Sıralama kuralları tanımlandığında, nesneler için başlangıç koşulları belirlenebilir. Uygulamanın bir sonraki adımı, eylemlerin ve bunların nesnelere etkilerinin tanımlanmasıdır. Bu adımda olası eylemler; maliyet, zaman vb. parametre değerleri ve bunların nesneler üzerindeki etkileri ile tanımlanır. Bu noktada, sıralama modelinin oluşturulması için parametreler toplanır. Daha sonra TÇKSP modeli problem varsayımları göz önünde bulundurularak ve toplanan olası parametre değerleri yardımıyla oluşturulur. Oluşturulan bulanık parametreli TÇKSP modeli, uygun bir çözüm yöntemi kullanılarak farklı üyelik değerleri altında çözülür. Son adımda, karar verici için çözüm tablosunda amaç fonksiyon değeri, bütçe harcaması miktarları ve seçilen eylemler

sunulur. Karar vericinin kabul edilebilir belirsizliğine göre, alternatiflerin ve sınıflarının nihai performans puanları raporlanır. Yöntem seçimi ve uygulama adımları ile ilgili akış şeması Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Uygulanacak yöntem seçimine yönelik akış şeması

5. BULANIK BELİRSİZLİK ALTINDA TEK AMAÇLI MODELLER

Bu bölümde, bazı parametrelerinde bulanık belirsizliğin söz konusu olduğu TÇKSP için tek amaç fonksiyonu içeren modeller sunulmuştur. Bu modellerden ilkinde eylem etki değerlerinin ve eylem maliyetlerinin bulanık olduğu durumda, kaynak kısıtlaması göz önünde bulundurularak en iyi sınıflandırmayı belirlemek hedeflenmiştir. Bu model için, bina enerji verimini iyileştirme ve lisans eğitiminde sınıf başarısını iyileştirme üzerine iki örnek problem çözümü sunulmuştur. İkinci model, iyileştirme eylemleri gerçekleştirebilecek farklı uygulayıcıların varlığını göz önünde bulundurarak, iki kaynak kısıtlaması altında en iyi sınıflandırmayı bulmaya çalışmaktadır. Bu model, bina enerji verimi iyileştirmesi örneği için çözülmüştür. İlk iki modelde, nesnelerin sınıflara atanması için doğrusal ayrıştırma fonksiyonu kullanılmaktadır. Üçüncü modelde ise, nesneleri sınıflara atamada eklemeli fayda fonksiyonu yaklaşımına başvurulmakta ve kaynak miktarlarının bulanık belirsiz olduğu iki kaynak kısıtlı en iyi sınıflandırmayı belirlemek amaçlanmaktadır. Bu modelin örnek uygulamaları olarak bina enerji veriminin ve yayın taslaklarının iyileştirilmesi verilmiştir.

İlk iki modelin çözümünde Carlsson ve Korhonen'in bulanık çözüm yaklaşımı [64] kullanılırken, üçüncü modelin çözümünde ise Vergeday'ın çözüm yaklaşımından [65] faydalanılmıştır.

5.1. Model – 1: Doğrusal Ayrıştırma Fonksiyonu ile Sıralama

Doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile nesnelerin hangi sınıfa atanacağının belirlendiği bu modelde, nesnelerin kriter bazında puanlarının ağırlıklı toplamı hesaplanarak sınıf alt ve üst sınırları ile kıyaslanır. Bir nesnenin ait olduğu sınıf, kriter bazında puanlarının ağırlıklı toplamının alt ve üst sınırı arasında kaldığı sınıftır.

Modelde amaç fonksiyonu olarak istenmeyen sınıflara atanan nesne sayısını en küçüklemek kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonu ile mümkün olan en çok sayıda nesnenin istenen sınıflara geçişini sağlayacak en iyi eylemleri belirlemek hedeflenmiştir.

Nesnelerin kriter bazında puanlarının maliyet temelli olduğu, diğer bir deyişle düşük puanların daha çok tercih edilen sınıflara karşılık geldiği bir durum için problemin matematiksel modeli modelde yer alan kümeler, parametreler ve karar değişkenlerinin tanımlamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur:

Kümeler

i : nesneler

j : kriterler

k : iyileştirme eylemleri

h : sınıflar

Parametreler

o_{ij} : i nesnesinin j kriteri açısından mevcut durumu

$\tilde{\delta}_{ijk}$: k eylemini uygulamanın i nesnesinin j kriteri bazında puanına bulanık etki değeri

$\tilde{c}_k$: k eyleminin ihtiyaç duyduğu kaynak miktarı için bulanık değer

b_h : h sınıfına ait üst sınır değeri

B : toplam kullanılabilir kaynak miktarı

w_j : j kriterine ait ağırlık değeri

M : yeterince büyük bir sayı

Karar değişkenleri

o'_{ij} : i nesnesinin j kriteri açısından yeni durumu

$$y_{hi} = \begin{cases} 1, i \text{ nesnesi } h \text{ sınıfına atanırsa} \\ 0, \text{ diğer durumda} \end{cases}$$

$$x_k = \begin{cases} 1, k \text{ eylemi uygulanırsa} \\ 0, \text{ diğer durumda} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$enk \sum_{h=1}^{h_{istenmeyen}} \sum_{i=1}^{q} y_{hi} \qquad (5.1)$$

kısıtlar

$$o'_{ij} = o_{ij} + \sum_{k=1}^{m} \tilde{\delta}_{ijk}\, x_k \qquad \forall i, j \qquad (5.2)$$

$$\sum_{k=1}^{m} \tilde{c}_k\, x_k \le B \qquad (5.3)$$

$$\sum_{h=1}^{t} y_{hi} = 1 \qquad \forall i \qquad (5.4)$$

$$\sum_{j=1}^{n} o'_{ij} w_j \le b^{h-1} + M(1 - y_{hi}) \qquad \forall i\ ,\ \forall h = 2,...,t \qquad (5.5)$$

$$\sum_{j=1}^{n} o'_{ij} w_j \ge b^{h} + M(1 - y_{hi}) \qquad \forall i\ ,\ \forall h = 1,...,t-1 \qquad (5.6)$$

$$x_k \in \{0,1\} \qquad \forall k \qquad (5.7)$$

$$y_{hi} \in \{0,1\} \qquad \forall h,i \qquad (5.8)$$

Eş. 5.1 modelin amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu modelde amaç, tercih edilmeyen sınıflara atanan nesne sayısını en küçüklemektir. Seçilen eylemler sonucunda nesnelerin kriter bazında puanlarının yeni durumu Eş. 5.2 yardımıyla hesaplanmaktadır. Uygulanacak eylemlerde kullanılabilecek toplam kaynak miktarına ilişkin kısıtlama Eş. 5.3'de verilmiştir. Nesnelerin yalnızca ve mutlaka bir sınıfa atanacağı Eş. 5.4'de, sınıflara atanma kuralı ise Eş. 5.5 ve Eş. 5.6'da gösterilmiştir. Karar değişkenlerinin işaret kısıtlamaları Eş. 5.7 ve Eş. 5.8'de verilmiştir.

Modelin çözümüne örnek olması için, bina enerji verimi iyileştirmesi için tadilat eylemi belirleme ve sınıf başarısını iyileştirmek için ek ders içeriği oluşturma üzerine iki farklı örnek uygulama sunulmuştur.

5.1.1. Örnek problem – 1

Ülkemizde binaların yıllık enerji tüketimi üzerinden enerji verimi etiketini belirlemeyi sağlayan BEP – TR modeli ile binalar A-G aralığında harflerle ifade edilen enerji etiketlerini almak zorundadırlar. Yeni yapılan binaların en az C sınıfı olacak şekilde tasarlanması gerekirken mevcut binaların da enerji etiketlerinin belirlenmesi zorunludur. Bu zorunluluk doğrultusunda on binadan oluşan bir site yönetiminin enerji verimini artırabilmek için bir

tadilat planı oluşturma kararı aldığını düşünelim. Site yönetimi binaların enerji etiketi sınıflarını iyileştirebilmek için belirledikleri bütçe kısıtı altında istenmeyen sınıflarda kalan bina sayısını en küçüklemeyi amaçlayan iyileştirme planını belirlemek istemektedir. Örnek uygulamada ülkemizde halihazırda bina enerji etiketi belirlemede kullanılan BEP – TR modelinde kullanılan [67] ve aşağıda verilen yedi kriter ile enerji verimi değerlendirmesi yapılacaktır:

K1. Konum ve iklim verisi,
K2. Geometrik biçim,
K3. Bina çevresi,
K4. Mekanik sistemler,
K5. Aydınlatma sistemi,
K6. Sıcak su sistemi,
K7. Yenilenebilir enerji ve kojenerasyon

Bu kriterler temelinde binalar değerlendirilecek ve aşağıda verilen beş tadilat eylemi arasından hangilerinin uygulanacağı belirlenecektir.

E1. Enerji verimi en iyi çatı tipi ile mevcut çatıyı değiştirmek,
E2. Binanın ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemini en yeni sistem ile değiştirmek,
E3. Aydınlatma sistemini en verimli aydınlatma sistemi ile değiştirmek,
E4. Merkezi bir sıcak su sistemi kurmak,
E5. Enerji talebini desteklemek için çatılara güneş panelleri kurmak

Binaların kriter bazında puanlarının 0 – 30 aralığında Çizelge 5.1'de verildiği gibi ölçüldüğünü, BEP – TR modelinde yer alan her bir kriterin enerji tüketimi ile ilişkilendirilen değerler olması sebebiyle de kriterler için verilen değerlerden "0" ile en verimli durumun, "30" ile en kötü durumun ifade edildiğini kabul edelim.

Çizelge 5.1. Binaların mevcut durumda kriter bazında puanları

Bina	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
B1	19	12	14	11	9	16	13
B2	23	15	23	20	19	15	18
B3	21	20	23	23	16	24	26
B4	14	19	16	9	8	18	15
B5	28	25	21	23	24	22	27
B6	22	26	28	8	7	13	12
B7	13	1	3	1	2	2	2
B8	20	13	22	10	10	15	15
B9	12	19	11	16	5	20	17
B10	12	16	15	11	7	9	3

BEP – TR modeli ile Bina Enerji Performansı (BEP) değeri hesaplanmakta ve bu değer ile enerji etiketi belirlenmektedir. Değerlendirilmek üzere dikkate alınan beş tadilat eyleminin BEP kriterlerine etkileri Çizelge 5.2'de verildiği gibi olsun. Yüksek puan kötü performansa karşılık geldiğinden tadilat eylemlerinin kriter bazında değerlere etkisi negatif kabul edilmiştir. Hiçbir eylemin konum ve iklim verisi kriteri üzerinde değişiklik oluşturmadığı, bazı eylemlerin birden fazla kriteri etkilediği ve bazı kriterlerin de birden fazla eylemden etkilendiği Çizelge 5.2'de görülebilir.

Çizelge 5.2. Eylemlerin maliyet ve etki değerleri

Eylem	E1		E2		E3	E4	E5
Etkilediği Kriter	K2	K3	K4	K6	K5	K6	K7
B1	(-6, -8)	(-9, -10)	(-8, -9)	(-12, -14)	(-4, -5)	(-8, -10)	(-7, -8)
B2	(-5, -7)	(-15, -16)	(-14, -15)	(-10, -13)	(-13, -16)	(-6, -7)	(-7, -9)
B3	(-12, -15)	(-14, -18)	(-16, -18)	(-15, -16)	(-9, -10)	(-16, -18)	(-20, -22)
B4	(-10, -11)	(-8, -12)	(-6, -7)	(-14, -15)	(-6, -7)	(-11, -12)	(-8, -10)
B5	(-14, -18)	(-13, -16)	(-18, -19)	(-14, -17)	(-13, -16)	(-12, -15)	(-21, -25)
B6	(-16, -19)	(-13, -14)	(-5, -6)	(-6, -9)	(-3, -4)	(-8, -9)	(-6, -7)
B7	(-2, 0)	(0, -2)	(0, 0)	(0, -1)	(0, -1)	(0, 0)	(0, -1)
B8	(-8, -9)	(-15, -17)	(-5, -7)	(-11, -12)	(-6, -8)	(-6, -9)	(-11, -13)
B9	(-10, -12)	(-4, -6)	(-10, -12)	(-14, -15)	(-1, -2)	(-13, -14)	(-12, -13)
B10	(-7, -9)	(-8, -9)	(-9, -10)	(-7, -8)	(-5, -7)	(-6, -8)	(0, -1)
Eylem Maliyeti	(450, 300)		(800, 700)		(125, 100)	(240, 200)	(300, 250)

Doğrusal ayrıştırma fonksiyonunda ihtiyaç duyulan kriter ağırlıkları Kabak ve diğerleri [68] tarafından hesaplanan ve Çizelge 5.3'de verilen değerler olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 5.3. Kriter ağırlıkları

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Ağırlık Değeri	0,27	0,07	0,10	0,16	0,12	0,08	0,20

BEP değerine bağlı olarak binaların enerji sınıfları Çizelge 5.4'de verilen sınıf sınır değerleri kullanılarak belirlenmektedir.

Çizelge 5.4. Enerji sınıfları için sınıf sınır değerleri

Sınıf	Sınır Değerler
A	BEP $\leq$ 5
B	5 < BEP $\leq$ 10
C	10 < BEP $\leq$ 14
D	14 < BEP $\leq$ 18
E	18 < BEP $\leq$ 22
F	22 < BEP $\leq$ 26
G	26 < BEP $\leq$ 30

Örnek uygulamada site yönetiminin binaların A, B veya C sınıflarına atanabilecek enerji verimine sahip olmasını istedikleri varsayılmaktadır.

Modelin çözülebilmesi için Eş. 5.2 ve Eş. 5.3'de verilen denklemlerde yer alan bulanık parametrelerle ilgili dönüşümler yapılmış ve Eş. 5.9 ve Eş. 5.10'da verilen denklemler ile değiştirilmiştir. Dönüşümler yapılırken eylem etki değerlerinin en az olduğu ve eylem maliyetlerinin en yüksek olduğu zaman üyelik fonksiyonu değerinin 1 olduğu, etki değeri arttıkça ve maliyetler düştükçe üyelik değerinin azaldığı, etkinin en yüksek ve maliyet değerinin en düşük olduğu zaman ise 0 olduğu kabul edilmiştir.

$$o_{ij}^{'} = o_{ij} + \sum_{k=1}^{m} \left(\delta_{ijk}^{l} + \left(\delta_{ijk}^{u} - \delta_{ijk}^{l} \right) \mu \right) x_k \qquad \forall i, j \tag{5.9}$$

$$\sum_{k=1}^{m} \left(c_k^u - \left(c_k^u - c_k^l \right) \mu \right) x_k \leq B \tag{5.10}$$

Örnek problemin çözümü için model ve problem verileri GAMS paket programında EK-1'de verilen şekilde kodlanmıştır. Intel® Core™ i7-5500U 2,40 GHz işlemcili 8 GB RAM belleğe sahip bir kişisel bilgisayarda Carlsson ve Korhonen'in bulanık çözüm yaklaşımı kullanılarak CPLEX çözücüsü yardımıyla çözülmüştür. Farklı üyelik değerleri için elde edilen çözüm sonuçları, seçilen eylemler ve binaların atandığı enerji verimi sınıfları Çizelge 5.5'de verilmiştir. Çizelgede verilen amaç fonksiyonu değeri, istenmeyen D, E, F, G sınıflarına düşen binaların sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 5.5. Bina enerji verimi iyileştirme uygulaması için çözüm değerleri

Üyelik değeri	Amaç fonksiyonu değeri	Seçilen eylemler	Bina									
			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
1,0	3	A3, A4, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
0,9	3	A3, A4, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
0,8	3	A3, A4, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
0,7	3	A3, A4, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
0,6	3	A3, A4, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	C	B
0,5	3	A1, A5	C	D	D	C	D	C	A	C	C	B
0,4	3	A1, A3, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
0,3	3	A1, A3, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	C	B
0,2	3	A1, A3, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	C	B
0,1	3	A1, A3, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	C	B
0,0	3	A1, A4, A5	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
Mevcut durum			D	E	F	C	F	D	A	D	C	B

Herhangi bir iyileştirme eyleminin uygulanmadığı durumda sınıflandırma sonucu altı bina istenmeyen sınıflara atanmıştır. Eylemlerin uygulanması sonucunda yalnızca üç bina istenmeyen sınıflarda kalmış, yedi bina ise istenen (A, B, C) sınıflarına atanır hale gelmiştir. Başlangıçta F sınıfında olan B3 ve B5 ile E sınıfında olan B2 binaları için yeni durumlarda binalar istenen sınıflara düşmüş olmasa da belirsizliğin incelenen tüm düzeyleri için sınıf iyileştirmesi elde edildiği ve binaların D sınıfına yükseldikleri gözlenmektedir. Belirsizlik düzeyindeki değişime bağlı olarak problem parametreleri de değiştiğinden B4 ve B9 binalarında olduğu gibi nesnelerin atandıkları sınıflarda değişimler söz konusu olmuştur. Deterministik durum olan üyelik değerinin 1 olduğu durumda da amaç fonksiyonu değeri belirsizlik içeren durumlara denk çıkmıştır.

Elde edilen sonuçlar, amaç fonksiyonu değeri değişmese de farklı üyelik değerleri için uygulanmak üzere seçilen eylemlerin değiştiğini ve parametre değerlerinin değişmesinden ötürü farklı sınıflara atanma durumlarının oluştuğunu ispatlar niteliktedir. Karar verici katlanılabilir bulduğu belirsizlik veya üyelik değerine bağlı olarak farklı eylemleri uygulamak üzere seçebilir. Bu seçimler binaların sınıflarında değişikliklere sebep olabilir.

Belirsizliğin yaşamın ayrılmaz bir parçası olduğu düşünülürse, karar vericinin katlanabileceği belirsizlik düzeyinin uygulanacak eylem planının belirlenmesine etkisi daha iyi anlaşılacaktır.

Çözüm sonuçlarına binalar açısından bakıldığında, belirsizlik söz konusu olsa dahi binaların enerji sınıflarının genel olarak iyileştirildiği görülmektedir. Üyelik değerine bağlı olarak küçük farklılıklar içeren iyileştirme planları elde edilmiştir.

5.1.2. Örnek problem – 2

Üniversitelerde eğitim döneminin son haftasında yapılan telafi derslerinde öğrencilerin dönem içinde eksik kaldıkları konular tekrar edilerek öğrencilerin beceri düzeyleri arttırılmaya çalışılır. Bu uygulamada yirmi beş öğrencinin bulunduğu Yöneylem Araştırması dersi için final sınavından önceki hafta yapılması planlanan telafi dersinde öğrencilerin derste anlatılan konuları uygulama becerilerini artırmak amacıyla ders kapsamında anlatılan altı konudan hangilerine yer vermek gerektiğine karar verilecektir. En fazla sayıda öğrencinin başarı düzeyini istenen seviyeye çıkarmak amaçlanırken, ders süresini aşmayacak şekilde hangi konulardan soru çözüleceği belirlenmeye çalışılmaktadır. Bunun için amaç fonksiyonu olarak DC ve altında harf notları alan öğrenci sayısının en küçüklenmesi kullanılmaktadır.

Öğrencilerin konulara yatkınlık düzeyleri izleme testleri yapılarak ölçülmüş ve dersi veren öğretim üyesi tarafından öğrencilerin bu testlerde yaptıkları hatalar üzerinden her bir konu hakkında çözülecek problemin öğrencilerin konuyu uygulama becerisine sağlayacağı katkılar belirlenmiştir. Çizelge 5.6 öğrencilerin her bir konuya yatkınlık derecelerini 0 – 100 ölçeğinde göstermektedir.

Çizelge 5.6. Öğrencilerin konulara yatkınlık düzeyleri

Öğrenci	Konu 1	Konu 2	Konu 3	Konu 4	Konu 5	Konu 6
Ö1	0	100	100	88	90	0
Ö2	17	87	50	0	10	17
Ö3	33	87	100	100	100	100
Ö4	0	0	100	78	40	67
Ö5	50	33	65	60	40	17
Ö6	17	0	50	50	4	67
Ö7	0	43	25	63	100	17
Ö8	33	93	75	50	90	17
Ö9	0	83	100	50	80	17
Ö10	17	50	75	100	80	17
Ö11	17	0	100	75	60	67
Ö12	33	87	100	100	90	67
Ö13	0	87	100	88	0	67
Ö14	0	100	100	10	60	17
Ö15	0	43	75	63	10	17
Ö16	17	100	100	100	80	17
Ö17	0	47	75	50	90	67
Ö18	50	100	65	100	40	50
Ö19	67	73	100	0	60	67
Ö20	0	100	100	48	27	100
Ö21	50	0	100	50	90	67
Ö22	0	93	100	50	70	0
Ö23	17	0	100	88	70	100
Ö24	17	0	65	90	10	17
Ö25	0	0	75	50	0	67

Yapılacak uygulama dersinin öğrencilere yapacağı katkı ve soru çözme süreleri Çizelge 5.7'de verilmiştir. Etki değerlerini ve çözüm sürelerini ifade etmede, öğretim üyesi bulanık değerler kullanmış ve küçük etkinin ve uzun sürede çözümün gerçekleşmesinin üyeliğini 1, yüksek etkinin ve düşük sürede çözümün gerçekleşmesinin üyeliğini 0 olarak değerlendirmiştir.

Çizelge 5.7. Çözülecek örnek problemlerin öğrencilerin yatkınlığına etkisi

Öğrenci	Konu 1	Konu 2	Konu 3	Konu 4	Konu 5	Konu 6
Ö1	(75, 80)	(0, 0)	(0, 0)	(2, 12)	(10, 10)	(50, 60)
Ö2	(33, 43)	(3, 13)	(30, 30)	(50, 60)	(40, 50)	(23, 43)
Ö3	(37, 57)	(3, 3)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)
Ö4	(50, 70)	(50, 60)	(0, 0)	(12, 17)	(30, 40)	(13, 23)
Ö5	(20, 30)	(27, 47)	(15, 25)	(20, 30)	(30, 50)	(43, 63)
Ö6	(33, 63)	(40, 80)	(25, 40)	(20, 30)	(36, 76)	(13, 13)
Ö7	(60, 80)	(27, 37)	(15, 25)	(7, 7)	(0, 0)	(0, 0)
Ö8	(17, 27)	(7, 7)	(0, 5)	(30, 40)	(0, 0)	(23, 23)
Ö9	(30, 30)	(0, 7)	(0, 0)	(20, 50)	(0, 0)	(43, 63)
Ö10	(23, 33)	(10, 30)	(25, 25)	(0, 0)	(20, 20)	(33, 43)
Ö11	(0, 0)	(30, 40)	(0, 0)	(0, 15)	(20, 30)	(23, 33)
Ö12	(67, 67)	(13, 13)	(0, 0)	(0, 0)	(10, 10)	(0, 13)
Ö13	(80, 90)	(13, 13)	(0, 0)	(12, 12)	(40, 40)	(23, 33)
Ö14	(60, 70)	(0, 0)	(0, 0)	(40, 60)	(20, 30)	(33, 63)
Ö15	(30, 50)	(17, 37)	(15, 25)	(12, 27)	(20, 50)	(13, 43)
Ö16	(58, 73)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(20, 20)	(33, 63)
Ö17	(40, 70)	(18, 43)	(5, 15)	(10, 30)	(0, 10)	(8, 13)
Ö18	(40, 50)	(0, 0)	(25, 25)	(0, 0)	(30, 50)	(20, 30)
Ö19	(13, 23)	(12, 17)	(0, 0)	(50, 80)	(20, 40)	(13, 33)
Ö20	(60, 80)	(0, 0)	(0, 0)	(27, 32)	(33, 53)	(0, 0)
Ö21	(0, 40)	(30, 60)	(0, 0)	(30, 50)	(0, 10)	(3, 3)
Ö22	(60, 70)	(7, 7)	(0, 0)	(30, 50)	(20, 30)	(30, 50)
Ö23	(13, 23)	(10, 10)	(0, 0)	(12, 12)	(10, 30)	(0, 0)
Ö24	(23, 43)	(30, 30)	(25, 35)	(10, 10)	(40, 60)	(23, 23)
Ö25	(0, 20)	(0, 20)	(25, 25)	(20, 50)	(0, 20)	(3, 33)
Çözüm Süresi	(30, 20)	(30, 20)	(20, 20)	(25, 20)	(25, 20)	(30, 20)

Dersi veren öğretim üyesi tarafından final sınavında derste anlatılan her bir konu için belirlenen soru ağırlıkları Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Final sınavı için belirlenen soru ağırlıkları

Konu	Konu 1	Konu 2	Konu 3	Konu 4	Konu 5	Konu 6
Ağırlık Değeri	0,15	0,15	0,20	0,10	0,20	0,20

Dönem sonunda harf notlarının hangi aralıklardan verileceği dönem içinde öğretim üyesi tarafından ilan edilmiştir. Harf notları için alt sınır değerleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Harf notu alt sınır değerleri

Harf notu	Alt sınır
AA	82,50
BA	70,50
BB	66,50
CB	64,50
CC	59,50
DC	49,50
DD	39,50
FD	34,50
FF	0,00

Tüm bu veriler ışığında, öğretim üyesi 100 dakika sürecek telafi dersinde hangi konuları ele alması gerektiğini belirlemeye çalışmaktadır. Öğretim üyesi tüm öğrencilerin dersten başarılı olma koşulu olan CC ve üstünde notlar almasını istemekte, dolayısıyla DC ve altındaki harf notlarını alan öğrenci sayısını en küçüklemek istemektedir.

Bu uygulamada nesnelerin kriter bazında puanları fayda temelli olduğundan, diğer bir deyişle yüksek puan daha iyi sınıflara karşılık geldiğinden modelde duruma uygun değişikliklerin yapılması için Eş. 5.5 ve Eş. 5.6'da verilen sınıflara atama kısıtları, Eş. 5.11 ve Eş. 5.12'de verilen şekle dönüştürülmüştür.

$$\sum_{j=1}^{n} o_{ij}^{'} w_j \geq b^{h+1} - M(1-y_{hi}) \qquad \forall\, i\ ,\ \forall\, h = 1,\ldots,t-1 \qquad (5.11)$$

$$\sum_{j=1}^{n} o_{ij}^{'} w_j \leq b^{h} + M(1-y_{hi}) \qquad \forall\, i\ ,\forall\, h = 2,\ldots,t \qquad (5.12)$$

GAMS paket programında kodlanan modele ilişkin, Intel® Core™ i7-5500U 2,40 GHz işlemcili 8 GB RAM belleğe sahip bir kişisel bilgisayarda Carlsson ve Korhonen'in bulanık çözüm yaklaşımı kullanılarak CPLEX çözücüsü yardımıyla elde edilen çözüm sonuçları Çizelge 5.10'da sunulmuştur. Bu çizelgede, mevcut durumdaki ve her bir üyelik değeri için

yapılan çözümlerde DC ve altı not alan öğrenci sayıları ile hangi soruların derste çözülmesi gerektiği verilmiştir.

Çizelge 5.10. Telafi dersi planlama uygulaması için çözüm değerleri

Üyelik Değeri	Amaç fonksiyonu değeri	Soru					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Mevcut durum	15						
1,0	6		√			√	√
0,9	6	√				√	√
0,8	7		√	√			√
0,7	7		√	√			√
0,6	4	√	√	√		√	
0,5	4	√	√	√		√	
0,4	5	√		√		√	√
0,3	4	√		√		√	√
0,2	3	√		√		√	√
0,1	4	√	√	√	√		
0,0	2	√		√	√	√	√

Başlangıç durumunda telafi dersi yapılmadığında on beş öğrencinin DC ve altındaki harf notlarını alacağı bilinmektedir. Üyelik değerinin 1 olduğu deterministik durumda dahi dikkat çeken iyileşme olduğu görülmektedir. Belirsizliğin farklı düzeyleri için seçilen konulara ve bu konulardan soru çözmenin öğrencilerin başarı düzeyine etkisine bağlı olarak en çok yedi, en az iki öğrencinin istenmeyen durum olan DC ve altındaki notlarda kalacağı çözüm sonuçlarından anlaşılmaktadır. Değişen parametre değerleri sonucunda çözümün farklı üyelik değerleri için farklı konulardan soru çözmenin öğretim üyesine karar desteği olarak sunulduğu görülmektedir. Çözümün üyeliğindeki değişime bağlı olarak etki değerleri artarken, çözüm süreleri kısalmaktadır. Belirsiz parametrelerdeki üyeliğe bağlı bu çelişki nedeniyle amaç fonksiyonu değerlerinde monoton artan veya monoton azalan bir yapı oluşmamaktadır.

Sonuçlardan üyelik değerine bağlı olarak etki değerlerindeki ve çözüm sürelerindeki değişimin amaç fonksiyonu ve ders planında değişikliklere yol açtığını yorumlamak mümkündür. Dersi planlayan öğretim üyesi bu sonuçlar arasından tercih edeceği bir üyelik değerine bağlı olarak telafi dersi planlamasını yapabilir.

Çizelge 5.11'de üyelik değerinin 0,5 olduğu durumda oluşacak yeni durum ve öğrencilerin harf notlarındaki değişim sunulmuştur.

Çizelge 5.11. μ =0,5 için öğrenci yatkınlık düzeyleri ve harf notları

Öğrenci	Konu 1	Konu 2	Konu 3	Konu 4	Konu 5	Konu 6	Yeni Not	İlk Not
Ö1	77,5	100	100	88	100	0	BA	CC
Ö2	55	95	80	0	55	17	DC	FF
Ö3	80	90	100	100	100	100	AA	AA
Ö4	60	55	100	78	75	67	BA	DD
Ö5	75	70	85	60	80	17	CC	DD
Ö6	65	60	82,5	50	60	67	CB	FF
Ö7	70	75	45	63	100	17	CC	DD
Ö8	55	100	77,5	50	90	17	CB	CC
Ö9	30	86,5	100	50	80	17	CC	DC
Ö10	45	70	100	100	100	17	BA	DC
Ö11	17	35	100	75	85	67	CB	DC
Ö12	100	100	100	100	100	67	AA	BA
Ö13	85	100	100	88	40	67	BA	DC
Ö14	65	100	100	10	85	17	CB	DC
Ö15	40	70	95	63	45	17	DC	FF
Ö16	82,5	100	100	100	100	17	BA	BB
Ö17	55	77,5	85	50	95	67	BA	DC
Ö18	95	100	90	100	80	50	AA	CC
Ö19	85	87,5	100	0	90	67	BA	CB
Ö20	70	100	100	48	70	100	AA	CB
Ö21	70	45	100	50	95	67	BA	CC
Ö22	65	100	100	50	95	0	BB	DC
Ö23	35	10	100	88	90	100	BA	CB
Ö24	50	30	95	90	60	17	DC	FF
Ö25	10	10	100	50	10	67	DD	FF

Elde edilen çözüm sonuçlarına göre ilk durumda 15 öğrencinin notu DC ve daha düşük harflerde iken, 0,5 üyelik değerine sahip çözüme göre yalnızca 4 öğrencinin notu DC ve daha düşük harflerde kalmıştır. Telafi dersinin yapılması ile 0,5 belirsizlik altında notu AA olan bir öğrenci dışında tüm öğrencilerin notları iyileştirilmiş olmaktadır.

Bu sonuçlara bakarak telafi dersi planlamasında bu modelin uygulamasının öğretim hedeflerine destek olabileceği ve bulanık parametreli TÇKSP modelinin benzer yapıdaki eğitim – öğretim planlama çalışmalarında karar vericilere fayda sağlayabileceği söylenebilir.

5.2. Model – 2: Eylemleri Farklı Uygulayıcıların Yapabildiği Durum İçin Sıralama

Bazı işlerde, eylemi gerçekleştirecek farklı uygulayıcıların varlığı söz konusu olabilir. Örneğin, yapılacak bir tamirat işi için farklı ustalar birbirinden farklı tamamlanma zamanları ve farklı maliyet teklifleri sunabilir, ya da satın alınacak teknik özellikleri belirli bir makinenin imalatı ve kurulumu için, farklı üreticiler değişik fiyat ve teslim tarihleri teklif edebilirler. Bu örneklere benzer durumların mümkün olduğu sistemlerde iyileştirme planları oluşturulurken farklı uygulayıcılardan alınacak teklifler TÇKSP modeli ile değerlendirilebilir. Bir uygulayıcının var kabul edildiği durumlarda tamamlanma zamanları tüm işlerin ayrı ayrı yapılma zamanlarının toplamı iken, farklı uygulayıcıların bulunduğu durumda her bir uygulayıcının ayrı bir işi gerçekleştirebileceği düşünülebilir. Bu da iyileştirmenin toplam tamamlanma zamanını azaltır.

Bu modelde, doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile sıralama probleminde eylemleri uygulamak için farklı uygulayıcıların varlığı ele alınmıştır. İlk modelden farklı olarak bu modelde istenen sınıflara atanan nesne sayısının en büyüklenmesi ele alınmış, eylemlerin nesnelerin kriter bazında puanlarına etki değerindeki ve eylemlerin ihtiyaç duyduğu kaynak miktarındaki belirsizliğe ek olarak toplam kaynak miktarı değerinde ve toplam tamamlanma zamanında da belirsizlik olduğu dikkate alınmıştır.

Problemin matematiksel modeli, modelde yer alan kümeler, parametreler ve karar değişkenlerinin tanımları ile birlikte aşağıda verilmiştir:

Kümeler

i : nesneler

j : kriterler

k : eylemler

l : uygulayıcılar

h : sınıflar

Parametreler

$\tilde{c}_{kl}$: l uygulayıcısı tarafından k eylemini gerçekleştirmede ihtiyaç duyulan bulanık kaynak miktarı

$\tilde{t}_{kl}$: l şirketi tarafından sunulan k eyleminin bulanık tamamlanma süresi

$\tilde{B}$: toplam kaynak miktarı için bulanık değer

o_{ij} : j kriteri bazında i nesnesinin mevcut durumu

$\tilde{\delta}_{ijk}$: k eyleminin i nesnesine j kriteri bazında bulanık etki değeri

w_j : j kriterine ait ağırlık değeri

b^h : h sınıfına ait üst sınır değeri

$\tilde{T}$: tamamlanma süresi üst sınırı için bulanık değer

M : yeterince büyük bir sayı

Karar değişkenleri

o'_{ij} : j kriteri bazında i nesnesinin yeni durumu

CTG_l : l uygulayıcısının yapacağı işler için toplam tamamlanma süresi

CT : tüm iyileştirme eylemleri için tamamlanma süresi

$$x_{kl} = \begin{cases} 1, l \text{ şirketi } k \text{ eylemini uygulamak için seçilmişse} \\ 0, \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$y_{hi} = \begin{cases} 1, i \text{ nesnesi } h \text{ grubuna atanmışsa} \\ 0, \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$enb \sum_{h=1}^{h_{istenen}} \sum_{i=1}^{m} y_{hi} \tag{5.13}$$

kısıtlar

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{l=1}^{L} \tilde{c}_{kl} x_{kl} \le \tilde{B} \tag{5.14}$$

$$o'_{ij} = o_{ij} + \sum_{k=1}^{K} \tilde{\delta}_{ijk} \sum_{l=1}^{L} x_{kl} \qquad \forall i, j \tag{5.15}$$

$$\sum_{j=1}^{n} o'_{ij} w_j \ge b^{h-1} - M(1 - y_{hi}) \qquad \forall i, \ \forall h = 2, \ldots, t \tag{5.16}$$

$$\sum_{j=1}^{n} o_{ij}^{'} w_j \le b^h + M(1-y_{hi}) \qquad \forall i\ ,\ \forall h = 1,\ldots,t-1 \qquad (5.17)$$

$$\sum_{l=1}^{L} x_{kl} \le 1 \qquad \forall k \qquad (5.18)$$

$$\sum_{h=1}^{t} y_{hi} = 1 \qquad \forall i \qquad (5.19)$$

$$\sum_{k=1}^{K} \tilde{t}_{kl} x_{kl} \le CTG_l \qquad \forall i \qquad (5.20)$$

$$CT \ge CTG_l \qquad \forall l \qquad (5.21)$$

$$CT \le \tilde{T} \qquad (5.22)$$

$$x_{kl} \in \{0,1\} \qquad \forall k,l \qquad (5.23)$$

$$y_{hi} \in \{0,1\} \qquad \forall h,i \qquad (5.24)$$

$$CTG_l \ge 0 \text{ ve tamsayı} \qquad \forall l \qquad (5.25)$$

$$CT \ge 0 \text{ ve tamsayı} \qquad (5.26)$$

Modelin amaç fonksiyonu Eş. 5.13'de ifade edilmiştir. Amaç, istenen sınıflara atanan nesne sayısını en fazla yapmaktır. Eş. 5.14 kaynak sınırlamasını göstermektedir. Nesnelerin kriter bazında puanları Eş. 5.15 kullanılarak hesaplanmaktadır. Sınıflara nesnelerin atanması Eş. 5.16 ve Eş. 5.17'de açıklanan şekilde, doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile bütünleştirilen puanın sınıf üst sınırlarıyla kıyaslanması yoluyla yapılmaktadır. Eş. 5.18 yapılacak her bir eylemin sadece bir uygulayıcı tarafından yapılabileceğini veya eylemin yapılmayacağını belirtmektedir. Her nesnenin bir sınıfa atanması gerekliliği Eş. 5.19'da ifade edilmiştir. İyileştirme eylemlerinin tamamlanma süresi Eş. 5.20, Eş. 5.21 ve Eş. 5.22 ile hesaplanmakta ve her bir uygulayıcının kendisine verilen eylemleri tamamlama sürelerinden en büyük olanı olarak tanımlanmaktadır. Bu süre iyileştirme eylemleri için izin verilen sınırı geçemez. Eylemlerin seçimi ve nesnelerin sınıflara atanması kararları 0 – 1 tamsayılı değişkenler olup Eş. 5.23 ve Eş. 5.24'de buna ilişkin işaret kısıtları verilmiştir. Tamamlanma sürelerine ilişkin karar değişkenleri ise Eş. 5.25 ve Eş. 5.26'da tanımlandığı gibi negatif olamayan tamsayılardır.

5.2.1. Örnek problem – 1

Doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile sıralama modeli için çözülen bina enerji verimini iyileştirme örnek problemi, yukarıda açıklanan modele uyarlanarak çözülmüştür. Yeni duruma ilişkin problem tanımlaması ve problem verileri açıklanarak çözüm sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

Site yönetiminin iyileştirme eylemleri için üç uygulayıcı şirketten süre ve eylemi gerçekleştirmenin bedeline ilişkin teklifler almıştır. Site yönetimi sitedeki on binadan en fazla sayıda binanın A, B veya C sınıflarına atanmasını beklemektedir. Tadilat eylemleri için 210 000 TL bütçe ayrılmış olup, bu miktarın 60 000 TL kadar artırılabileceği varsayılmaktadır. Bununla birlikte iyileştirme işlemlerinin 15 gün içinde tamamlanması istenmekte, tamamlanma zamanında da 5 güne kadar ekleme yapılabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla; bu örnekte problemin amacı, bütçe ve zaman kısıtlamaları altında istenen sınıflara atanan bina sayısını azami düzeye çıkarmaktır. İyileştirme eylemleri, farklı maliyet ve tamamlanma süresi teklifleri sunan farklı uygulayıcı şirketler tarafından gerçekleştirilebilir. Her şirket bir seferde bir eylem gerçekleştirebilir, ancak farklı şirketler aynı anda farklı işlerde çalışabileceği düşünülmüştür. Ayrıca, gerçekleştirilecek bir iyileştirme eylemi, yalnızca bir şirkete verilebilir.

Bina performansını değerlendirmek için bu örnekte de BEP – TR modelinde dikkate alınan ve daha önce çözülen bina enerji verimi iyileştirme uygulamasında yer verilen yedi kriter kullanılmıştır. Binaların her bir kriter bazında durumları en iyi durum 0, en kötü durum 30 ile ifade edilecek şekilde 0 - 30 puan aralığında ifade edilecek şekilde Çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Örnek problem için mevcut kriter bazında puan değerleri

Bina	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
B1	11	16	15	11	7	9	3
B2	25	25	21	23	24	22	27
B3	12	1	3	1	2	2	2
B4	13	19	16	9	8	18	15
B5	20	26	28	8	7	13	12
B6	17	12	14	11	9	16	13
B7	11	19	11	16	5	20	17
B8	19	20	23	23	16	24	26
B9	21	15	23	20	19	15	18
B10	18	13	22	10	10	15	15

Sınıflandırılma, doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile yapılmış ve yine daha önceki uygulamada kullanılan Kabak ve diğerleri [68] ağırlık değerlerinden yararlanılmıştır. Kriter bazında puanların ağırlıklı toplamı alınarak hesaplanan BEP değeri kullanılarak binanın önceden alt ve üst sınırları tanımlanmış sınıflara ataması gerçekleştirilmiştir.

Binaların mevcut durumdaki puanları kullanılarak, enerji sınıfları Çizelge 5.13'de gösterilen şekilde belirlenmiştir:

Çizelge 5.13. Binaların başlangıçtaki enerji sınıfları

Bina	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
Enerji sınıfı	B	F	A	C	D	C	C	E	E	D

Binaların enerji verimini iyileştirmek üzere yapılacak tadilat için uygulanabileceği düşünülen ve bir önceki örnekte belirlenen beş eylemin sitede yer alan binaların enerji performansına bulanık belirsiz etki değerleri Çizelge 5.14'de verilmiştir. Verilen değer çiftlerinden ilki elde edilebilecek kesin değer olan en az etkiyi gösterirken, ikinci değerler ise gerçekleşmesi mümkün görülmeyen, üyelik değeri 0 olan değeri ifade etmektedir.

Çizelge 5.14. İyileştirme eylemlerinin bina enerji performansına etki düzeyleri

Eylem	E1		E2		E3	E4	E5
Etkilediği Kriter	K2	K3	K4	K6	K5	K6	K7
B1	(-7, -9)	(-8, -9)	(-9, -10)	(-7, -8)	(-5, -7)	(-6, -8)	(0, -1)
B2	(-14, -18)	(-13, -16)	(-18, -19)	(-14, -17)	(-13, -16)	(-12, -15)	(-21, -25)
B3	(-2, 0)	(0, -2)	(0, 0)	(0, -1)	(0, -1)	(0, 0)	(0, -1)
B4	(-10, -11)	(-8, -12)	(-6, -7)	(-14, -15)	(-6, -7)	(-11, -12)	(-8, -10)
B5	(-16, -19)	(-13, -14)	(-5, -6)	(-6, -9)	(-3, -4)	(-8, -9)	(-6, -7)
B6	(-6, -8)	(-9, -10)	(-8, -9)	(-12, -14)	(-4, -5)	(-8, -10)	(-7, -8)
B7	(-10, -12)	(-4, -6)	(-10, -12)	(-14, -15)	(-1, -2)	(-13, -14)	(-12, -13)
B8	(-12, -15)	(-14, -18)	(-16, -18)	(-15, -16)	(-9, -10)	(-16, -18)	(-20, -22)
B9	(-5, -7)	(-15, -16)	(-14, -15)	(-10, -13)	(-13, -16)	(-6, -7)	(-7, -9)
B10	(-8, -9)	(-15, -17)	(-5, -7)	(-11, -12)	(-6, -8)	(-6, -9)	(-11, -13)

Tadilat için belirlenen beş eylemi gerçekleştirmek üzere üç aday uygulayıcı şirketten iyileştirme eylemlerinin maliyetleri ve tamamlanma zamanları ile ilgili bilgiler alınmıştır. Bu değerler de bulanık belirsizliğe sahiptir. Çizelge 5.15'de görüldüğü gibi, uygulayıcı şirketlerin tekliflerinde farklı maliyet ve tamamlanma süresi değerleri bulunmaktadır. Site yönetimi, 3 şirketten gelen tekliflerin belirsizliğini ve değişkenliğini göz önünde bulundurarak iyileştirme planı oluşturmalıdır.

Çizelge 5.15. Şirketlerin maliyet ve tamamlanma süresi teklifleri

Eylem	Şirket	E1	E2	E3	E4	E5
Maliyet (x 1 000 TL)	L1	(150, 110)	(190, 170)	(40, 30)	(90, 70)	(100, 90)
	L2	(140, 120)	(140, 135)	(50, 35)	(80, 70)	(120, 80)
	L3	(150, 100)	(175, 160)	(45, 35)	(90, 80)	(115, 90)
Süre (gün)	L1	(15, 12)	(10, 7)	(10, 9)	(11, 8)	(8, 6)
	L2	(18, 14)	(15, 14)	(10, 8)	(10, 8)	(9, 6)
	L3	(16, 13)	(9, 7)	(11, 9)	(10, 7)	(10, 6)

Problem parametrelerini belirledikten sonra, bulanık parametreli TÇKSP modeli oluşturularak istenen sınıflara atanan bina sayısını en büyüklemek için uygulanacak tadilat eylemleri ve uygulayıcılar belirlenmiştir.

Model GAMS paket programında EK-2'de verilen şekilde kodlanmış, Intel® Core ™ i7-5500U 2,40GHz işlemci ve 8 GB RAM donanımına sahip bir kişisel bilgisayarda, CPLEX çözücüsü ile Carlsson ve Korhonen'in bulanık çözüm yaklaşımı ile farklı üyelik değerleri

için çözülmüştür. Çözüm sonunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri, seçilen eylemler, harcanan bütçe ve tamamlanma zamanı değerleri Çizelge 5.16'da verilmiştir. Karar verici bu çözümlerden uygun gördüğünü seçebilir.

Çizelge 5.16. Farklı üyelik değerleri için çözüm sonuçları

Üyelik değeri	Amaç fonksiyonu değeri	Seçilen eylemler	Harcanan bütçe	Tamamlanma zamanı
Başlangıç	5	-	0	-
1,0	7	E1 (L1)	150000	15
0,9	7	E1 (L1)	146000	15
0,8	7	E3 (L2), E5 (L1)	145000	10
0,7	7	E4 (L3), E5 (L2)	195000	10
0,6	8	E2 (L2), E5 (L1)	234000	15
0,5	8	E2 (L2), E5 (L1)	232500	15
0,4	8	E2 (L2), E5 (L1)	231000	15
0,3	8	E2 (L2), E5 (L1)	229500	15
0,2	8	E2 (L3), E5 (L2)	251000	8
0,1	10	E2 (L2), E3 (L3), E5 (L1)	262500	15
0,0	10	E2 (L2), E3 (L3), E5 (L1)	260000	14

Çizelge 5.16'da verilen çözüm sonuçlarına göre başlangıç durumunda site yönetiminin iyileştirme eylemi yapmaması halinde sitede bulunan on binadan beşinin istenen sınıflarda yer aldığı, üyelik azalışı ile beraber seçilen eylem sayısının artışı ile birlikte tüm binaların istenen sınıflara yükseltildiği gözlenmektedir. Bu durumun sebebi üyelik değeri azaldıkça eylemlerin sınıfları iyileştirici yöndeki etkisinin artması, buna karşın maliyet ve eylem süresi değerlerinin ise azalmasıdır. Örneğin aynı eylemlerin seçildiği 0,5, 0,4 ve 0,3 üyelik değerine sahip çözümlerde amaç fonksiyonu değeri ve tamamlanma zamanı değişmezken bütçeden kullanılan miktar azalmaktadır. Başka bir örnek olarak üyeliğin 0,3 ve 0,2 olduğu çözümlerde amaç fonksiyonu değeri aynı iken eylem uygulayıcıları değişmiş, buna bağlı olarak bütçeden harcanan miktar artarken tamamlanma zamanı hemen hemen yarı değerine düşmüştür. Üyelik değerinin 1 olduğu deterministik durum ile 0,9 olduğu durumda amaç fonksiyonu değerleri ve seçilen eylemler birbirine denk çıksa da bulanık sayının etkisiyle harcanan bütçe miktarında farklılık olduğu görülmektedir.

Karar verici için kabul edilebilir belirsizlik seviyesinin 0,4 olduğunu varsayalım. Bu varsayım, üyelik değerinin 0,6 olduğu çözümün tercih edildiği anlamına gelir. Bu çözüm için binaların kriter bazında puanları ve atandıkları sınıflar Çizelge 5.17'de verilmiştir.

Çizelge 5.17. μ = 0,6 için bina performans puanları ve atandıkları sınıflar

Bina	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Atandığı sınıf
B1	11	16	15	1,6	7	1,6	2,6	B
B2	25	25	21	4,6	24	6,8	4,4	D
B3	12	1	3	1	2	1,6	1,6	A
B4	13	19	16	2,6	8	3,6	6,2	B
B5	20	26	28	2,6	7	5,8	5,6	C
B6	17	12	14	2,6	9	3,2	5,6	B
B7	11	19	11	5,2	5	5,6	4,6	B
B8	19	20	23	6,2	16	8,6	5,2	C
B9	21	15	23	5,6	19	3,8	10,2	D
B10	18	13	22	4,2	10	3,6	3,2	C

Çizelge 5.16 ve Çizelge 5.17 incelendiğinde, E2 ve E5 eylemleri uygulandığında binaların K4, K6 ve K7 kriterleri temelinde performans puanlarında değişimler olmuştur. Tercih edilen belirsizlik düzeyi altında, 15 günlük çalışma sonunda ve 234 000 TL bütçe harcaması ile tadilat eylemleri tamamlanacaktır. Bu eylemlerden sonra, başlangıçta beş olan istenen sınıflara atanan bina sayısı sekize çıkacaktır. Diğer binaların enerji verimini artırmak için daha sonra yeni iyileştirme planları aranabilir.

5.2.2. Örnek problem – 2

Bu uygulamada turizm sektöründen otel sınıflandırması problemi üzerinde durulmuştur. Otel tesislerinin çeşitli faktörler açısından değerlendirilmesi sonucunda bir yıldızdan beş yıldıza kadar yıldızlar kazanmakta ve otellerin sınıflandırılması bu şekilde yapılmaktadır. Otellerin sınıflandırılmasında kullanılan kriterler aşağıda verilmiştir:

K1. Oda imkânları
K2. İklimlendirme sistemi
K3. Toplantı düzenleme imkânları
K4. Yemek hizmetleri kalitesi
K5. Çamaşırhane hizmetleri
K6. Havuz ve hamam imkânları
K7. Otopark imkânları

Farklı şehirlerde hizmet veren on beş oteli satın alan uluslararası bir otel zinciri işletmecisi şirket, yeni otellerinin mevcut koşullarında iyileştirme yapmak ve otellerinin daha yüksek yıldızlara sahip hâle gelmesini planlamaktadır. Şirket yönetimi üç farklı uygulayıcıdan aldığı tadilat eylemi maliyeti ve tamamlanma süresi değerlerini dikkate alarak başlangıçta on beş otelden hiçbirinin sahip olmadığı sınıflar olan dört ya da beş yıldız sınıflarına en fazla sayıda otelin yükselmesini sağlayacak iyileştirme eylemlerinin belirlenmesini istemektedir. Eylemlerin farklı uygulayıcılar tarafından yapılması mümkün olup bir eylem yalnızca bir uygulayıcı tarafından yapılabilir. Farklı uygulayıcılar aynı zamanda çalışabilir ancak bir uygulayıcı aynı anda sadece tek bir eylemi gerçekleştirebilir. Bu kısıtlamalar altında belirsiz eylem etki düzeyleri, maliyet ve eylem gerçekleştirme süreleri dikkate alınarak iyileştirme planı belirlenmektedir.

Yönetilen 15 oteldeki mevcut durum puanları şirket yönetimi tarafından yukarıda bahsedilen yedi kriter açısından 0 – 100 puan aralığında Çizelge 5.18'de verildiği şekilde değerlendirmiştir.

Çizelge 5.18. Otel kalitesi iyileştirme örneği için mevcut durum puanları

Otel	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
O1	50	45	50	60	30	40	85
O2	65	50	60	55	45	50	70
O3	45	55	55	60	50	70	90
O4	40	50	45	50	60	60	70
O5	70	65	70	65	80	75	85
O6	80	60	75	70	65	85	90
O7	66	63	75	70	70	60	55
O8	53	50	60	55	65	60	75
O9	62	55	50	60	55	67	80
O10	53	45	60	55	45	65	63
O11	58	50	55	62	63	50	75
O12	62	60	55	57	67	60	65
O13	71	75	70	65	72	65	75
O14	68	65	65	70	74	70	80
O15	63	60	65	66	80	74	82

Şirket yönetimi tarafından her bir kriter temelinde iyileştirme gerçekleştirecek yedi eylem belirlenmiştir. Bu eylemler, ilgili kriter temelinde otelleri güncel teknolojiye sahip bir

duruma getirmeyi hedeflemektedir. Eylemlerin otellerin kriter bazında puanlarına bulanık etki değerleri Çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5.19. İyileştirici eylemlerin etki düzeyleri

Otel	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
O1	(25, 35)	(40, 45)	(30, 40)	(25, 35)	(50, 60)	(30, 40)	(5, 5)
O2	(20, 25)	(30, 40)	(15, 25)	(20, 30)	(25, 35)	(25, 30)	(20, 20)
O3	(35, 45)	(25, 25)	(10, 15)	(25, 30)	(20, 30)	(15, 20)	(0, 0)
O4	(30, 45)	(25, 35)	(25, 40)	(30, 40)	(30, 35)	(20, 30)	(15, 20)
O5	(20, 20)	(15, 25)	(20, 30)	(20, 25)	(5, 5)	(10, 15)	(0, 0)
O6	(15, 15)	(10, 30)	(10, 25)	(15, 25)	(15, 25)	(5, 10)	(5, 5)
O7	(19, 24)	(12, 22)	(5, 10)	(10, 15)	(10, 15)	(15, 20)	(20, 30)
O8	(27, 37)	(25, 35)	(30, 30)	(20, 30)	(15, 20)	(20, 25)	(5, 5)
O9	(18, 23)	(15, 30)	(20, 35)	(25, 35)	(20, 25)	(8, 13)	(10, 15)
O10	(22, 32)	(25, 35)	(10, 20)	(30, 40)	(15, 25)	(10, 15)	(12, 17)
O11	(12, 22)	(30, 40)	(10, 25)	(13, 23)	(17, 27)	(20, 30)	(10, 15)
O12	(23, 28)	(25, 30)	(15, 25)	(28, 33)	(23, 28)	(20, 20)	(15, 20)
O13	(19, 24)	(10, 15)	(15, 25)	(20, 25)	(13, 18)	(25, 25)	(10, 15)
O14	(17, 17)	(15, 25)	(10, 15)	(10, 15)	(11, 16)	(15, 20)	(10, 10)
O15	(12, 22)	(10, 20)	(15, 25)	(14, 19)	(5, 10)	(16, 16)	(3, 3)

Eylemleri gerçekleştirmek için iki uygulayıcıdan alınan eylem maliyetleri ve tamamlama süresi teklifleri Çizelge 5.20'de verilmiştir. Eylemler için yüksek maliyetlerin oluşması ve geç sürede tamamlanması üyelik derecesi 1 olan durumu, düşük maliyetlerin gerçekleşmesi ve erken sürelerde tamamlanması ise üyelik derecesi 0 olan durumu göstermektedir.

Çizelge 5.20. Uygulayıcıların maliyet ve tamamlanma süresi teklifleri

Eylem	Maliyet (x 1000 TL)		Süre (gün)	
Uygulayıcı	L1	L2	L1	L2
E1	(1000, 950)	(1100, 1000)	(30, 25)	(25, 25)
E2	(800, 775)	(750, 740)	(15, 15)	(20, 15)
E3	(200, 185)	(175, 165)	(10, 8)	(15, 12)
E4	(250, 230)	(275, 235)	(20, 15)	(15, 15)
E5	(30, 25)	(25, 25)	(5, 3)	(10, 7)
E6	(100, 90)	(125, 110)	(10, 8)	(10, 7)
E7	(75, 75)	(75, 70)	(10, 7)	(5, 4)

Sınıflandırma için doğrusal ayrıştırma fonksiyonunda kullanılacak kriter ağırlıkları otel yönetimi tarafından Çizelge 5.21'de verilen şekilde belirlenmiştir:

Çizelge 5.21. Kriter ağırlıkları

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Ağırlık Değeri	0,30	0,15	0,10	0,25	0,05	0,10	0,05

Otellerin atanacağı sınıflara karar verirken kullanılacak sınıf alt sınır değerleri Çizelge 5.22'de verilmiştir.

Çizelge 5.22. Otel sınıfları için alt sınır değerleri

Sınıf	Alt sınır
5 Yıldız	85
4 Yıldız	75
3 Yıldız	60
2 Yıldız	45
1 Yıldız	0

Şirket yönetimi, uygulanacak iyileştirme eylemlerinden sonra satın alınan otellerin içinden dört ve beş yıldızlı otel sayısının en fazla olmasını istemektedir. İyileştirme planı için 1 200 000 TL kaynak ayrılmış olup işlemlerin 35 gün içinde tamamlanması istenmektedir. İyileştirmeye artırılan kaynak miktarının 200 000 TL, tamamlanma süresinin ise 10 gün artırılabileceği değerlendirilmektedir. Yukarıda tanımlanan problem verileri kullanılarak bulanık parametreli TÇKSP modeli ile uygulanacak iyileştirme eylemleri ve uygulayıcılar belirlenmiştir.

GAMS paket programında kodlanan model, Intel® Core ™ i7-5500U 2,40GHz işlemci ve 8 GB RAM donanımına sahip bir kişisel bilgisayarda CPLEX çözücüsü ile Carlsson ve Korhonen'in bulanık çözüm yaklaşımından faydalanılarak farklı üyelik değerleri için çözülmüştür. Çözüm sonunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri, seçilen eylemler, harcanan bütçe ve tamamlanma zamanı değerleri Çizelge 5.23'de verilmiştir.

Çizelge 5.23. Farklı üyelik değerleri için çözüm sonuçları

Üyelik değeri	Amaç fonksiyonu değeri	Seçilen eylemler	Harcanan bütçe	Tamamlanma zamanı
Başlangıç	0	-	0	0
1,0	4	E2 (L2), E4 (L2), E6 (L1), E7 (L1)	1 200	35
0,9	5	E1 (L1), E5 (L2), E6 (L2), E7 (L2)	1 218	36
0,8	5	E2 (L2), E4 (L2), E5 (L1), E6 (L1), E7 (L1)	1 217	37
0,7	6	E2 (L2), E4 (L1), E5 (L2), E6 (L1), E7 (L2)	1 186,5	38
0,6	8	E1 (L1), E4 (L2), E5 (L2)	1 264	39
0,5	10	E2 (L2), E3(L2), E4 (L1), E5 (L2), E6 (L1)	1 275	40
0,4	10	E2 (L2), E3 (L2), E4 (L1), E5 (L1), E6 (L1)	1 272	41
0,3	12	E1 (L1), E4 (L2), E5 (L2), E6 (L1)	1 330	42
0,2	14	E1 (L1), E4 (L1), E5 (L2), E6 (L2)	1 332	43
0,1	14	E1 (L1), E4 (L1), E5 (L2), E6 (L2)	1 323,5	44
0,0	15	E1 (L1), E4 (L1), E5 (L1), E6 (L2), E7 (L2)	1 385	45

Başlangıç durumunda dört veya beş yıldıza sahip otel bulunmamaktadır. Üyelik değerinin azalması ile birlikte etki değerleri artmakta, maliyet ve eylem süresi değerleri azalmaktadır. Bu durum kullanılabilir bütçenin ve tamamlanma süresi kısıtlamasının gevşemesine olanak sağlamakta ve daha fazla sayıda otelin istenen sınıflara yükselmesine imkân vermektedir. Nitekim üyelik değerinin 1 olduğu deterministik durumda sadece dört otel istenen düzeye gelirken, üyelik değerinin sıfır olduğu durumda tüm oteller dört veya beş yıldız almaktadır.

Şirket yönetimi kabul edilebilir bulduğu belirsizlik düzeyine göre, Çizelge 5.23'de verilen çözümlerden herhangi birini uygulanacak iyileştirme planı olarak seçebilir. Örneğin, kabul edilebilir belirsizlik seviyesinin 0,5 olduğunu varsayalım. Bu varsayım, üyelik değerinin 0,5

olduğu çözümün tercih edildiği anlamına gelir. Bu çözüm için otellerin kriter bazında yeni puanları ve atandıkları sınıflar Çizelge 5.24'de verilmiştir.

Çizelge 5.24. μ = 0,5 için otel performans puanları ve atandıkları sınıflar

Bina	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Atandığı sınıf
O1	50	87,5	85	90	85	75	85	4
O2	65	85	80	80	75	77,5	70	4
O3	45	80	67,5	87,5	75	87,5	90	3
O4	40	80	77,5	85	92,5	85	70	3
O5	70	85	95	87,5	85	87,5	85	4
O6	80	80	92,5	90	85	92,5	90	5
O7	66	80	82,5	82,5	82,5	77,5	55	4
O8	53	80	90	80	82,5	82,5	75	3
O9	62	77,5	77,5	90	77,5	77,5	80	4
O10	53	75	75	90	65	77,5	63	3
O11	58	85	72,5	80	85	75	75	3
O12	62	87,5	75	87,5	92,5	80	65	4
O13	71	87,5	90	87,5	87,5	90	75	4
O14	68	85	77,5	82,5	87,5	87,5	80	4
O15	63	75	85	82,5	87,5	90	82	4

Çizelge 5.23 ve Çizelge 5.24 incelendiğinde, belirsizlik düzeyi arttıkça bütçe ve zaman kısıtlarının genişletilmesine ek olarak eylem sürelerinde ve maliyetlerinde oluşan azalmalar daha fazla iyileştirme eyleminin seçilmesine dolayısıyla birinci ve ikinci sınıfa yükselen otel sayısının artmasına olanak sağlamıştır. Ancak, üyelik değerleri azaldığı için bu sonuçların gerçekleşmesinin daha az mümkün olduğu da unutulmamalıdır. μ = 0,5 için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, 1 275 000 TL harcama ve 40 günlük çalışma sonunda mevcut durumda üçüncü ve dördüncü sınıf olan 15 otelden sadece beşinin üçüncü sınıfta kaldığı diğer 10 otelin ise, birinci ve ikinci sınıf otel olarak sınıflandırıldığı görülmektedir.

5.3. Model – 3: Eklemeli Fayda Fonksiyonuna Dayalı Sıralama

Bazı durumlarda kriter değerlerinin belirli aralıklarda farklı düzeylerde katkı sağladığı görülebilir. Bu durumlarda fayda fonksiyonları tanımlanarak fayda değerleri tespit edilebilir ve bu değerler üzerinden karar verilebilir. TÇKSP ile ele alınabilecek uygulamalarda da

fayda fonksiyonu kullanmak problem yapısına uygun düşebilir. Bu bölümde nesne sınıflarının belirlenmesinde eklemeli fayda fonksiyonu kullanılan bir TÇKSP modeli önerilmektedir.

Bu model ile ele alınan problemde, alternatif uygulayıcıların bulunamadığı durumlar dikkate alınmıştır. İyileştirme eylemlerinin gerçekleştirilmesinin belirli miktarda kaynağa ihtiyaç duyacağı ve her bir eylemin belirli bir zamanda tamamlanabileceği varsayılmaktadır. Eylemler için tek uygulayıcı olduğundan aynı zamanda birden fazla eylemin uygulanamayacağı düşünülmektedir. Toplam kaynak miktarı ve toplam iyileştirme zamanı değerlerinin bulanık belirsiz olduğu varsayılarak istenen sınıflara atanan bina sayısını en büyüklemek için Vergeday'ın önerdiği bulanık çözüm yaklaşımı ile modelin çözümü iki örnek problem için gösterilmiştir.

Modelin matematiksel formülasyonu, modelde yer alan kümeler, parametreler ve karar değişkeni tanımları ile birlikte aşağıda verilmiştir:

Kümeler

i : nesneler

j : kriterler

k : eylemler

l : fayda değer aralıkları

h : sınıflar

Parametreler

c_k : k eylemini gerçekleştirmede ihtiyaç duyulan kaynak miktarı

t_k : k eylemini gerçekleştirme süresi

$\tilde{B}$: toplam kaynak miktarı için bulanık değer

$\tilde{T}$: toplam iyileştirme zamanı sınırı için bulanık değer

o_{ij} : j kriteri bazında i nesnesinin mevcut durumu

δ_{ijk} : k eyleminin i nesnesine j kriteri bazında etki değeri

v_{jl} : j kriterinin l değer aralığı için birim fayda değeri

g_{jl} : j kriterinin l değer aralığı için alt sınır değeri

b^h : h sınıfına ait üst sınır değeri

M : yeterince büyük bir sayı

Karar değişkenleri

$o_{ij}^{'}$: j kriteri bazında i nesnesinin yeni durumu

$u_j\left(o_i^{'}\right)$: i nesnesinin j kriteri fayda değeri

$$x_k = \begin{cases} 1, k \text{ eylemi uygulanırsa} \\ 0, \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$y_{hi} = \begin{cases} 1, i \text{ nesnesi } h \text{ grubuna atanmışsa} \\ 0, \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$zx_{kijl} = \begin{cases} 1, k \text{ eylemi uygulandığında } i \text{ nesnesi } j \text{ kriteri için } l \text{ aralığına giriyorsa} \\ 0, \text{ diğer durumda} \end{cases}$$

$$z_{ijl} = \begin{cases} 1, i \text{ nesnesi } j \text{ kriteri için } l \text{ aralığına giriyorsa} \\ 0, \text{ diğer durumda} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$enb \sum_{h=1}^{t_{istenen}} \sum_{i=1}^{q} y_{hi} \tag{5.27}$$

kısıtlar

$$o_{ij}^{'} = o_{ij} + \sum_{k=1}^{m} \delta_{ijk} x_k \qquad \forall i, j \tag{5.28}$$

$$\sum_{k=1}^{m} c_k x_k \le \tilde{B} \tag{5.29}$$

$$\sum_{k=1}^{m} t_k x_k \le \tilde{T} \tag{5.30}$$

$$\sum_{h=1}^{t} y_{hi} = 1 \qquad \forall i \tag{5.31}$$

$$o_{ij}^{'} \ge g_j^l - M(1 - z_{ijl}) \qquad \forall i, j \text{ ve } \forall l = 2, ..., s_j \tag{5.32}$$

$$o_{ij}^{'} \le g_j^{l+1} + M(1 - z_{ijl}) \qquad \forall i, j \text{ ve } \forall l = 1, ..., s_j - 1 \tag{5.33}$$

$$\sum_{l=1}^{s_j+1} z_{ijl} = 1 \qquad \forall\, i,\ j \qquad (5.34)$$

$$u_j\left(o_i^{'}\right) = \sum_{l=1}^{s_j}\sum_{a=1}^{l-1}\left[v_{ja} + \frac{o_{ij} - g_j^l}{g_j^{l+1} - g_j^l} v_{jl} \right] z_{ijl} + \sum_{l=1}^{s_j}\sum_{k=1}^{m}\left[\frac{\delta_{ijk}\, zx_{kijl}}{g_j^{l+1} - g_j^l} v_{jl} \right] + \sum_{l=1}^{s_j+1} v_{jl} z_{ij(s_j+1)} \qquad \forall\, i,\ j \qquad (5.35)$$

$$zx_{kijl} \le x_k \qquad \forall k, i, j, l \qquad (5.36)$$

$$zx_{kijl} \le z_{ijl} \qquad \forall k, i, j, l \qquad (5.37)$$

$$zx_{kijl} \ge x_k + z_{ijl} - 1 \qquad \forall k, i, j, l \qquad (5.38)$$

$$\sum_{j=1}^{n} u_j\left(o_i^{'}\right) \ge b^{h-1} - M(1 - y_{hi}) \qquad \forall\, i \text{ ve } \forall\, h = 2, \ldots, t \qquad (5.39)$$

$$\sum_{j=1}^{n} u_j\left(o_i^{'}\right) \le b^{h} + M(1 - y_{hi}) \qquad \forall i \text{ ve } \forall h = 1, \ldots, t-1 \qquad (5.40)$$

$$x_k \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \qquad (5.41)$$

$$y_{hi} \in \{0,1\} \qquad \forall\, h, i \qquad (5.42)$$

$$z_{ijl} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i,\ j, l \qquad (5.43)$$

$$zx_{kijl} \in \{0,1\} \qquad \forall k, i, j, l \qquad (5.44)$$

Eş. 5.27'de modelin amaç fonksiyonu verilmiştir. Ele alınan problemde amaç fonksiyonu istenen sınıflara atanan nesne sayısının en fazla olmasını hedeflemektedir. Nesnenin seçilen eylemlere bağlı olarak kriter bazında puanı Eş. 5.28'de tanımlandığı gibidir. Seçilecek eylemler için kullanılacak kaynak miktarının kaynak sınırını geçemeyeceği Eş. 5.29'da ifade edilmektedir. Ayrıca, eylemlerin gerçekleştirilmesi için süre kısıtlaması bulunmakta olup Eş. 5.30'da gösterilmiştir. Nesnelerin yalnızca ve mutlaka bir sınıfa atanması zorunluluğu Eş. 5.31'de verilmektedir. Eş. 5.32, Eş. 5.33 ve Eş. 5.34 nesnelerin kriter bazında puanlarının tek bir fayda değer aralığına düşebileceğini ve her bir kriter için hangi fayda değer aralığına düşeceğinin aralık alt sınırları ile kıyaslanarak belirlendiğini göstermektedir. Doğrusal hâle dönüştürülmesi Mousseau ve diğerleri [30] tarafından gerçekleştirilen eklemeli fayda fonksiyonu Eş. 5.35'de gösterilmiştir. Bu eşitlik ile yeni durumun fayda değeri nesnenin kriter temelinde mevcut puanının sağladığı fayda değeri ile seçilen iyileştirici eylemlerden sağlanacak fayda değeri toplanarak hesaplanmaktadır. Eş. 5.36, Eş. 5.37 ve Eş. 5.38,

eklemeli fayda fonksiyonunun doğrusal hâle getirilmesi için kullanılan yardımcı değişkenler arasındaki ilişkileri modellemektedir. Nesnelerin eklemeli fayda değerleri Eş. 5.39 ve Eş. 5.40'da gösterildiği şekilde sınıf sınırları ile kıyaslanarak sınıf atamaları gerçekleştirilmektedir. Modelde kullanılan karar değişkenlerine ait işaret kısıtları eylem seçimini ifade eden karar değişkenleri için Eş. 5.41, nesnelerin sınıflara atamalarını ifade eden karar değişkenleri için Eş. 5.42, eklemeli fayda fonksiyonunu doğrusal hâle dönüştürmek için kullanılan yardımcı karar değişkenleri için Eş. 5.43 ve Eş. 5.44'de verilmiştir.

5.3.1. Örnek problem - 1

Eklemeli fayda fonksiyonuna dayalı bulanık sıralama modelinden elde edilen sonuçları incelemek için, doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile sıralama modelinde (Model – 1) kullanılan bina enerji verimi iyileştirme probleminin çözümü yapılacaktır. Önceki model ile bu model arasındaki farklılıklar nedeniyle eylem etki değerleri ve eylem maliyetleri için kesin değerler ve eylem gerçekleştirme süreleri Çizelge 5.25'de, sınıflara nesne atama için fayda aralıkları Çizelge 5.26'da, her bir kriterin fayda değer aralıklarına ait birim fayda değerleri Çizelge 5.27'de verilmiştir. Her bir kriter için yedi fayda değer aralığı tanımlanmış olup Çizelge 5.28'de verilmiştir.

Çizelge 5.25. Eylemlerin etki, maliyet ve süre değerleri

Eylem	E1		E2		E3	E4	E5
Etkilediği Kriter	K2	K3	K4	K6	K5	K6	K7
B1	-8	-10	-9	-14	-5	-10	-8
B2	-7	-16	-15	-13	-16	-7	-9
B3	-15	-18	-18	-16	-10	-18	-22
B4	-11	-12	-7	-15	-7	-12	-10
B5	-18	-16	-19	-17	-16	-15	-25
B6	-19	-14	-6	-9	-4	-9	-7
B7	0	-2	0	0	-1	0	-1
B8	-9	-17	-7	-12	-8	-9	-13
B9	-12	-6	-12	-15	-2	-14	-13
B10	-9	-9	-10	-8	-7	-8	-1
Eylem Maliyeti	300		700		100	200	250
Eylem Süresi (gün)	12		8		6	6	4

Çizelge 5.26. Fayda değer aralıkları alt sınır değerleri

Kriter \ Aralık	1	2	3	4	5	6	7	8
K1	0	15	17	20	21	24	28	30
K2	0	10	14	16	20	23	26	30
K3	0	5	11	14	19	25	28	30
K4	0	7	13	16	20	23	27	30
K5	0	5	9	11	14	16	20	30
K6	0	10	12	15	17	19	24	30
K7	0	5	10	12	15	25	28	30

Çizelge 5.27. Fayda değer aralıkları için birim fayda değerleri

Kriter \ Aralık	1	2	3	4	5	6	7
K1	0,011	0,022	0,030	0,041	0,051	0,057	0,058
K2	0,004	0,006	0,008	0,010	0,013	0,014	0,015
K3	0,005	0,006	0,014	0,015	0,016	0,019	0,025
K4	0,006	0,010	0,016	0,022	0,029	0,037	0,040
K5	0,001	0,006	0,011	0,017	0,02	0,029	0,036
K6	0,002	0,006	0,01	0,014	0,015	0,016	0,017
K7	0,008	0,01	0,014	0,028	0,042	0,048	0,05

BF, binaya ait enerji performansı değerinin fayda fonksiyonundaki karşılığını göstermek üzere binaların enerji sınıflarının belirlenmesinde Çizelge 5.28 ile verilen sınıf sınır değerleri dikkate alınmaktadır.

Çizelge 5.28. Sınıflara atama için fayda değer aralıkları

Sınıf	Sınır Değerler
A	BF $\leq$ 0,037
B	0,037 < BF $\leq$ 0,103
C	0,103 < BF $\leq$ 0,206
D	0,206 < BF $\leq$ 0,353
E	0,353 < BF $\leq$ 0,539
F	0,539 < BF $\leq$ 0,759
G	0,759 < BF $\leq$ 1.000

İyileştirme eylemleri için 750 birim bütçe ayrıldığını, bu değer ile ilgili belirsizliğin artış yönünde ve 250 birim olduğunu, yani karar vericinin bütçeyi 750 birimden 1 000 birime kadar artırabileceğini kabul edelim. Bunun yanında tadilat eylemlerinin tamamlanması için izin verilen sürenin 21 gün olduğunu ve bu sürenin de yedi güne kadar artabileceğini, yani 28 güne çıkabileceğini kabul edelim. Vergeday'ın yaklaşımı [65] kullanılarak çözüm yapılabilmesi için modelde Eş. 5.29 ve Eş. 5.30'da verilen bütçe (kaynak) ve zaman kısıtları, Eş. 5.45 ve Eş. 5.46'da verilen eşitliklere dönüştürülmüştür.

$$\sum_{k=1}^{m} c_k x_k \leq 750 + 250(1-\mu) \tag{5.45}$$

$$\sum_{k=1}^{m} t_k x_k \leq 21 + 7(1-\mu) \tag{5.46}$$

Modelin GAMS paket programında EK-3'de verilen şekilde kodlanmış ve CPLEX çözücüsü kullanılarak Intel® Core ™ i7-5500U 2,40GHz işlemci ve 8 GB RAM donanıma sahip bir kişisel bilgisayarda farklı üyelik değerleri için çözülerek elde edilen amaç fonksiyonu değerleri, bina sınıfları, ilk durumdaki nesne sınıfları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.29'da verilmiştir.

Çizelge 5.29. Fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modeli sonuçları

Üyelik Değeri	Amaç Fonksiyonu Değeri	Seçilen Eylemler	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
İlk Durum	6	-	C	D	E	C	F	D	A	C	C	B
μ=1,0	7	E1, E3	C	D	D	C	D	C	A	C	C	A
μ=0,9	7	E1, E3	C	D	D	C	D	C	A	C	C	A
μ=0,8	8	E1, E3, E5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,7	8	E1, E3, E5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,6	8	E1, E3, E5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,5	8	E1, E3, E5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,4	8	E1, E3, E5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,3	8	E1, E3, E5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,2	8	E1, E3, E5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,1	8	E1, E3, E5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,0	9	E1, E3, E4, E5	B	C	C	A	D	C	A	B	B	A

Fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modeli, bütçe ve süre sınırı arttıkça istenen sınıflara düşen bina sayısını artıracak iyileştirme eylemlerini seçmiştir. Çözüm sonuçları ilk durumda altı olan istenen sınıflardaki bina sayısının çözümün üyelik değeri azaldıkça arttığını göstermektedir. Vergeday'ın yaklaşımı yalnızca kısıt sağ tarafında bulanık belirsizlik olan problemleri çözmede kullanılabildiği için üyelik değeri azaldıkça kısıt gevşemekte, bu sayede seçilen eylem sayısı artmakta ve nesne puanları iyileşmektedir. Yöntemin bu özelliği nedeniyle, üyelik değerinin 1 olduğu durum için iki eylem seçilebilirken üyelik değerindeki azalma ile birlikte seçilen eylem sayısı önce üçe, sonra dörde yükselmiştir. Seçilen eylem sayısının artışı ile birlikte istenen sınıflardaki bina sayısının artışı sırasıyla sekize ve dokuza yükselmiştir. Deterministik durumu ifade eden üyelik değerinin 1 olduğu durumda yedi bina istenen seviyedeyken, üyelik değerinin 0 olduğu durumda 9 bina istenen seviyeye gelmiştir. Üyelik değerinin 0,3 olduğu çözüm için binaların yeni durumda kriter bazında aldıkları puanlar Çizelge 5.30'da verilmiştir:

Çizelge 5.30. Binaların fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modeli ile yapılan uygulama sonucu elde edilen yeni durumları

Bina	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	Fayda Değeri	Sınıfı
B1	19	4	4	11	4	16	5	0,1058	C
B2	23	8	7	20	3	15	9	0,2366	C
B3	21	5	5	23	6	24	4	0,2660	D
B4	14	8	4	9	1	18	5	0,0742	B
B5	28	7	5	23	8	22	2	0,3690	D
B6	22	7	14	8	3	13	5	0,1766	C
B7	13	1	1	1	1	2	1	0,0149	A
B8	20	4	5	10	2	15	2	0,1024	C
B9	12	7	5	16	3	20	4	0,1056	C
B10	12	7	6	11	0	9	2	0,0360	A

Üyelik değerinin 0,3 olduğu durumda 1, 3 ve 5 numaralı eylemler seçilmiştir. Bu eylemler bina çatılarının değiştirilmesini, aydınlatma sisteminin yenilenmesini ve çatılara güneş paneli kurulmasını kapsamaktadır. Bu eylemler sonucunda binaların geometrik biçim (K2), bina çevresi (K3), aydınlatma sistemi (K5) ve yenilenebilir enerji ve kojenerasyon (K7) kriterleri temelinde iyileştirilmesi sağlanacaktır. Azalan enerji tüketimi sonucunda binalar daha iyi enerji verimine sahip olacaktır. Böylece enerji etiketleri daha çok istenen sınıflara yükselecektir.

5.3.2. Örnek problem - 2

Araştırma merkezlerinde ekip direktörünün yönlendirmesi doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmalar proje, makale, kitap ve konferans bildirisi gibi farklı türde araştırma çıktılarına dönüştürülürler. Merkezin başarısı ve saygınlığı araştırma çıktılarının kalitesi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle ekip direktörleri mümkün olduğunca fazla sayıda araştırma çıktısının yayınlanmasını hedeflemektedirler. Merkezin ilerleyen dönemlerde elde edebileceği fon ve altyapı kaynakları yayın performansı düzeyiyle doğrudan ilişkilidir.

Bu kısımda, bir araştırma merkezinde çalışan on kişilik ekibin yürüttüğü çalışma sonuçlarından oluşturdukları yayın taslaklarının sınıflandırılması ve iyileştirilmesi üzerine bir uygulama sunulmuştur.

Ekip üyeleri tarafından hazırlanan on yayın çalışması taslağı, daha önceden belirlenmiş hedef dergilere gönderilecektir. Ekip direktörü çalışmaları dergi sistemlerine yüklemeden önce bir ön değerlendirmeden geçirerek derginin değerlendirme süreci öncesinde taslakların kalitesini arttırmayı hedeflemektedir. Bu amaçla yayın taslaklarını aşağıda verilen beş kriter bakımından inceleyerek 0 – 10 arasında puanlandırmıştır.

K1. Uygulama konusu
K2. Sayısal analiz
K3. Dil
K4. Biçim
K5. Literatür incelemesi

İnceleme sonunda direktör tarafından yayın taslaklarının durumlarına yönelik yapılan değerlendirmelere Çizelge 5.31'de yer verilmiştir:

Çizelge 5.31. Yayın taslakları için belirlenen mevcut durum puanları

Yayın taslağı	K1	K2	K3	K4	K5
Y1	7,90	8,10	7,60	8,70	6,30
Y2	9,00	6,60	6,70	8,50	5,90
Y3	4,30	5,10	5,20	3,10	8,40
Y4	7,60	6,50	7,70	7,20	6,40
Y5	6,80	5,90	6,10	5,70	5,50
Y6	7,20	7,50	6,80	8,80	5,60
Y7	5,20	5,20	5,20	5,00	4,20
Y8	4,60	4,50	4,60	4,10	6,50
Y9	7,00	8,20	6,60	7,70	7,90
Y10	6,10	5,40	5,60	7,00	5,00

Direktör, yayınları fayda değerlerine göre yayınlanmaya değer, düzeltme gerektiren ve yayınlanamaz sınıflarına ayırmayı düşünmektedir. Her bir kriter için puanlar, Çizelge 5.32'de verilen üç değer aralığına ayrılmış ve Çizelge 5.33'de verilen birim fayda değerleri kullanılarak sınıf değerlendirmeleri yapılmıştır.

Çizelge 5.32. Yayın değerlendirme kriterleri için fayda değer aralıkları

Kriter	G1	G2	G3	G4
K1	0,00	4,00	5,50	10,00
K2	0,00	4,00	6,00	10,00
K3	0,00	5,00	7,00	10,00
K4	0,00	1,00	4,50	10,00
K5	0,00	3,00	6,00	10,00

Çizelge 5.33. Fayda değer aralıkları için birim fayda değerleri

Kriter	G1	G2	G3
K1	0,020	0,085	0,105
K2	0,050	0,095	0,115
K3	0,030	0,055	0,075
K4	0,020	0,035	0,055
K5	0,010	0,115	0,135

Ekip direktörü, yayın taslakları için iyileştirmeler yapılması için ekip içinde çeşitli eylemler uygulanabileceğini düşünmektedir. Çalışma konusunu değiştirmek mümkün olmadığı için yayın taslakları üzerinde sayısal analizler, dil, biçim ve literatür bakımından iyileştirmeler yapılabileceği düşünülmektedir. Olası eylemler aşağıda listelenmiştir:

E1. Sayısal analizlerin genişletilmesi
E2. Dil düzeltmesi yapılması
E3. Biçim düzenlemesi
E4. Literatür incelemesinin genişletilmesi

Bu eylemlerin gerçekleştirilmesinin yayın taslaklarına etki düzeyleri, eylemleri gerçekleştirmek için ayrılması gereken adam gün cinsinden işgücü miktarı ve eylemleri tamamlamak için gereken süre (gün) Çizelge 5.34'de verilmiştir.

Çizelge 5.34. Eylemlerin etki düzeyleri, gerekli kaynak ve süre değerleri

Yayın	Eylem			
	E1	E2	E3	E4
Y1	1,50	2,20	1,30	2,70
Y2	2,50	2,40	0,80	3,20
Y3	3,50	3,40	5,50	1,00
Y4	2,10	1,30	1,90	2,70
Y5	1,70	2,00	2,90	2,40
Y6	1,50	2,20	0,80	4,20
Y7	2,70	3,50	3,60	4,90
Y8	3,30	2,80	3,40	2,50
Y9	0,40	1,80	1,50	1,50
Y10	2,70	2,90	2,10	3,60
Gereken İşgücü (adam gün)	40	15	20	50
Gereken Süre (gün)	8	7	2	10

Bir çalışmanın düzeltme gerektiren sınıfında olması için fayda değerinin en az 0,60 olması, yayına kabul edilebilir görülmesi için fayda değerinin en az 0,75 olması gerekmektedir. En fazla sayıdaki yayın taslağının yayınlamaya değer hâle getirilmesi için direktör tarafından 90 adam gün çalışma kapasitesi ve 15 günlük çalışma süresi tahsis edilmiştir. Ancak, laboratuvardaki çalışmaların durumuna bağlı olarak 35 adam gün ve 12 gün daha artışının mümkün olabileceği de değerlendirilmektedir. Bu bilgiler ışığında hangi eylemleri uygulamaya odaklanılacağını belirlemek için eklemeli fayda fonksiyonuna dayalı TÇKSP modeli oluşturularak iyileştirme planı yapılacaktır.

Vergeday'ın çözüm yaklaşımı ile modelin çözümü yapılmadan önce ilk uygulamadan farklı olarak kriter yapısı fayda temelli olduğundan Eş. 5.39 ve Eş. 5.40'da verilen sınıfa nesne atama kısıtları üzerinde Eş. 5.47 ve Eş. 5.48'de verilen değişiklikler yapılmıştır.

$$\sum_{j=1}^{n} u_j\left(o_i^{'}\right) \geq b^h - M(1-y_{hi}) \qquad \forall\, i \text{ ve } \forall h = 1,...,t-1 \qquad (5.47)$$

$$\sum_{j=1}^{n} u_j\left(o_i^{'}\right) \leq b^{h+1} + M(1-y_{hi}) \qquad \forall i \text{ ve } \forall\, h = 2,...,t \qquad (5.48)$$

Yapılan değişikliklerden sonra model GAMS paket programında CPLEX çözücüsü kullanılarak Intel® Core ™ i7-5500U 2,40GHz işlemci ve 8 GB RAM donanıma sahip bir kişisel bilgisayarda farklı üyelik değerleri için çözülmüştür. Çözüm sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ve seçilen iyileştirme eylemleri Çizelge 5.35'de verilmiştir.

Çizelge 5.35. Yayın taslağı iyileştirme örneği için çözüm sonuçları

Üyelik değeri	Amaç Fonksiyonu Değeri	Eylem			
	z	E1	E2	E3	E4
Mevcut durum	0				
μ=1,0	2	√	√		
μ=0,9	2	√	√		
μ=0,8	4		√		√
μ=0,7	4	√			√
μ=0,6	5		√	√	√
μ=0,5	5		√	√	√
μ=0,4	5	√		√	√
μ=0,3	5	√		√	√
μ=0,2	5	√		√	√
μ=0,1	5		√	√	√
μ=0,0	5	√	√		√

Başlangıç durumunda ekip direktörünün değerlendirmesi, hiçbir taslağın yayınlanmaya değer bulunmayacağı yönündedir. Eylemler, kaynak miktarlarındaki belirsizliğe bağlı olarak uygulandığında yayın taslaklarının arasından iki, dört veya beş tanesinin kabul edilebilir hale gelebileceği görülmektedir. Bir önceki uygulamaya benzer şekilde Vergeday yaklaşımı, üyelik değeri azalışı ile birlikte kaynak kısıtlamasını gevşetmekte, bu da daha fazla eylemin uygulanabilir hale gelmesine olanak sağlamaktadır. Üyelik değeri 0,8 olan çözüm için nesnelerin son durumları ve fayda değerlerine bağlı olarak yayın taslaklarının atandığı sınıflar Çizelge 5.36'da verilmiştir.

Çizelge 5.36. μ=0,8 için nesnelerin yeni durumları ve sınıf atamaları

Yayın	Kriter					Fayda Değeri	Sınıf
	K1	K2	K3	K4	K5		
Y1	7,90	8,10	9,80	8,70	9,00	0,830	Yayınlamaya değer
Y2	9,00	6,60	9,10	8,50	9,10	0,792	Yayınlamaya değer
Y3	4,30	5,10	8,60	3,10	9,40	0,525	Yayınlanamaz
Y4	7,60	6,50	9,00	7,20	9,10	0,736	Düzeltme gerekir
Y5	6,80	5,90	8,10	5,70	7,90	0,608	Düzeltme gerekir
Y6	7,20	7,50	9,00	8,80	9,80	0,801	Yayınlamaya değer
Y7	5,20	5,20	8,70	5,00	9,10	0,582	Yayınlanamaz
Y8	4,60	4,50	7,40	4,10	9,00	0,473	Yayınlanamaz
Y9	7,00	8,20	8,40	7,70	9,40	0,773	Yayınlamaya değer
Y10	6,10	5,40	8,50	7,00	8,60	0,621	Düzeltme gerekir

Karar vericinin %20 belirsizliğe göre yapacağı bir iyileştirme planı başlangıçta hiçbir yayın taslağı istenen sınıfta değil iken, dört çalışmayı yayınlamaya değer düzeye getirecektir. Bunu sağlayan yayın taslaklarının dil düzeltmelerinin yapılması ve literatür incelemesinin genişletilmesi eylemleridir. Altmış beş adam gün tahsis edilmesi ve 17 günlük bir çalışma sonucunda bu duruma ulaşılabileceği görülmektedir.

6. BULANIK BELİRSİZLİK ALTINDA İKİ AMAÇLI MODELLER

Nesnelerin sınıflandırılmasında, karar vericiler birbiri ile çelişen farklı amaçları aynı anda dikkate almak isteyebilirler. Amaç fonksiyonları için çözümden önce hedef değerler belirlenebilirse, çelişen amaçlar arasında uzlaşık bir çözüm hedef programlama yaklaşımı ile elde edilebilir. Bu bölümde, iyileştirme planı ile ilgili birden fazla hedefin olduğu durumları ele alan modellere yer verilmiştir. İki hedef arasında uzlaşık bir çözüme ulaşmak adına hedef programlama tekniğinden yararlanılan doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ve eklemeli fayda fonksiyonu ile sıralama modelleri sunulmuştur. Hedef değerlerden istenmeyen yöndeki sapmaların toplamını en küçükleme amacına dayalı bu modellerden doğrusal ayrıştırma fonksiyonuna dayalı model için eylemlere gereken kaynak miktarlarında ve eylemlerin etki değerlerinde belirsizlik olduğu düşünülürken, fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modelinde sadece eylemlere gereken kaynak miktarlarının belirsiz olduğu dikkate alınmıştır.

Doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile iki hedefli sıralama modeli bina enerji verimi iyileştirme ve sınıf başarısını iyileştirme örnekleri için, eklemeli fayda fonksiyonu ile iki hedefli sıralama modeli ise bina enerji verimini iyileştirme ve yayın taslağı iyileştirme örnekleri için Carlsson ve Korhonen'in çözüm yaklaşımı [35] kullanılarak çözülmüştür.

6.1. Model – 4: Doğrusal Ayrıştırma Fonksiyonu ile İki Hedefli Sıralama

Karar vericinin doğrusal ayrıştırma fonksiyonunu kullanarak sınıfları belirlediği durumda, iyileştirme maliyetinin ve istenen sınıflara düşen nesne sayısının değerlendirme kriteri olduğu kabul edilsin. Farklı uygulayıcılar tarafından eylemlerin gerçekleştirilebileceği ve uygulayıcıya bağlı olarak eylemlerin maliyet ve tamamlanma zamanlarının değiştiği varsayılsın. Ayrıca, aynı zamanda yalnızca bir eylemin uygulanabileceği ve her bir eylemin alternatif uygulayıcılardan sadece birisi tarafından gerçekleştirilebileceği düşünülsün. İfade edilen problem bu bölümde modellenmiştir. Hedef programlama yaklaşımından yararlanılan bu modelde, kaynak kullanım sınırından en az miktarda pozitif yönlü sapmaya ve istenen sınıflara düşmüş nesne sayısından en az miktarda negatif yönlü sapmaya sahip iyileştirme planı belirlenmektedir.

Model – 2'de verilen eylemlerin farklı uygulayıcılar tarafından gerçekleştirilebilmesi durumu bu modelde aynı anda birden fazla eylemin gerçekleştirilmesi durumu dikkate alınmadan, herhangi bir zamanda tek bir eylemin gerçekleştirilebileceği varsayımı altında modellenmiştir.

Modelin matematiksel formülasyonu, modelde kullanılan kümeler, parametreler ve karar değişkenlerinin tanımları ile birlikte aşağıda verilmiştir:

Kümeler

i : nesneler

j : kriterler

k : eylemler

l : uygulayıcılar

h : sınıflar

Parametreler

$\tilde{c}_{kl}$: l uygulayıcısı tarafından k eylemini gerçekleştirmede ihtiyaç duyulan bulanık kaynak miktarı

$\tilde{t}_{kl}$: l şirketi tarafından sunulan k eyleminin bulanık tamamlanma süresi

B : toplam kaynak miktarı için bulanık değer

o_{ij} : j kriteri bazında i nesnesinin mevcut durumu

$\tilde{\delta}_{ijk}$: k eyleminin i nesnesine j kriteri bazında bulanık etki değeri

w_j : j kriterine ait ağırlık değeri

b^h : h sınıfına ait üst sınır değeri

C : istenen sınıflara atanması beklenen hedef değer

$\tilde{T}$: eylemlerin tamamlanma zamanı için bulanık üst sınır değeri

M : yeterince büyük bir sayı

Karar değişkenleri

o'_{ij} : j kriteri bazında i nesnesinin yeni durumu

d_1^+ : birinci hedeften pozitif yönlü sapma miktarı

d_1^- : birinci hedeften negatif yönlü sapma miktarı

d_2^+ : ikinci hedeften pozitif yönlü sapma miktarı

d_2^- : ikinci hedeften negatif yönlü sapma miktarı

$$x_{kl} = \begin{cases} 1, l \text{ şirketi } k \text{ eylemini uygulamak için seçilmişse} \\ 0, \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$y_{hi} = \begin{cases} 1, i \text{ nesnesi } h \text{ grubuna atanmışsa} \\ 0, \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$enk \ d_1^+ + d_2^- \tag{6.1}$$

kısıtlar

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\tilde{c}_{kl}x_{kl} + d_1^- - d_1^+ = B \tag{6.2}$$

$$\sum_{h=1}^{h_{istenen}}\sum_{i=1}^{m} y_{hi} + d_2^- - d_2^+ = C \tag{6.3}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\tilde{t}_{kl}x_{kl} \le \tilde{T} \tag{6.4}$$

$$o_{ij}^{'} = o_{ij} + \sum_{k=1}^{K}\tilde{\delta}_{ijk}\sum_{l=1}^{L}x_{kl} \qquad \forall i, j \tag{6.5}$$

$$\sum_{l=1}^{L} x_{kl} \le 1 \qquad \forall k, l \tag{6.6}$$

$$\sum_{h=1}^{t} y_{hi} = 1 \qquad \forall i \tag{6.7}$$

$$\sum_{j=1}^{n} o_{ij}^{'} w_j \ge b^{h-1} - M(1 - y_{hi}) \qquad \forall i \text{ ve } \forall h = 2,...,t \tag{6.8}$$

$$\sum_{j=1}^{n} o_{ij}^{'} w_j \le b^{h} + M(1 - y_{hi}) \qquad \forall i \text{ ve } \forall h = 1,...,t-1 \tag{6.9}$$

$$x_{kl} \in \{0,1\} \qquad \forall k, l \tag{6.10}$$

$$y_{hi} \in \{0,1\} \qquad \forall h, i \tag{6.11}$$

$$d_1^-, d_1^+, d_2^-, d_2^+ \ge 0 \tag{6.12}$$

Eş. 6.1'de sunulan amaç fonksiyonu kaynak kullanım sınırından pozitif yönlü sapma ile istenen sınıflara atanan nesne sayısı hedefinden negatif yönlü sapmanın toplamını en

küçüklemeye çalışmaktadır. Eş. 6.2 iyileştirici eylemlere harcanan toplam kaynak miktarının, kaynak kullanım miktarı hedefinden sapmasını, Eş. 6.3, istenen sınıflara atanan nesne sayısının hedef değerden sapmasını hesaplamaktadır. İyileştirici eylemlerinin tamamlanma süresine ilişkin kısıtlama Eş. 6.4'de verilmiştir. Nesnenin iyileştirme eylemleri sonucu yeni durum Eş. 6.5 kullanılarak hesaplanmaktadır. Eş. 6.6, gerçekleştirilecek her bir iyileştirme eylemi için bir uygulayıcı seçilebileceğini kısıtlamaktadır. Her bir nesnenin bir sınıfa atanması zorunluluğu Eş. 6.7'de, yeni durumuna göre atanacağı sınıfın belirlenme yolu ise Eş. 6.8 ve Eş. 6.9'da ifade edilmiştir. Eylemlerin seçilme kararları ve nesneleri sınıflara atama kararları 0 – 1 tamsayılı değişken, hedef kısıtlarına ilişkin sapma değişkenleri ise negatif olmayan değişkenler olarak tanımlanmıştır. Karar değişkenlerine ait işaret kısıtlamaları sırasıyla Eş. 6.10, Eş. 6.11 ve Eş. 6.12'de gösterilmiştir.

6.1.1. Örnek problem – 1

Bina enerji verimi uygulaması için Çizelge 6.1'de sunulan binaların kriter bazında mevcut puanlarını, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'de sunulan uygulayıcıların maliyet ve tamamlama süresi tekliflerini inceleyen site yönetimi, en az sekiz binanın A, B ve C sınıflarına yükseltilmesini ve 750 birim olarak belirlenen bütçe sınırının mümkün olduğunca aşılmamasını hedeflediği varsayılmıştır.

Çizelge 6.1. Binaların kriter bazında mevcut puanları

Bina	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
B1	19	12	14	11	9	16	13
B2	23	15	23	20	19	15	18
B3	21	20	23	23	16	24	26
B4	14	19	16	9	8	18	15
B5	28	25	21	23	24	22	27
B6	22	26	28	8	7	13	12
B7	13	1	3	1	2	2	2
B8	20	13	22	10	10	15	15
B9	12	19	11	16	5	20	17
B10	12	16	15	11	7	9	3

Çizelge 6.2. Alternatif uygulayıcılara ait tadilat maliyet değerleri

Uygulayıcı	Eylem				
	E1	E2	E3	E4	E5
L1	(325, 400)	(700, 800)	(105, 115)	(200, 240)	(275, 290)
L2	(350, 430)	(750, 775)	(100, 125)	(210, 230)	(250, 300)
L3	(300, 450)	(725, 780)	(110, 115)	(205, 235)	(260, 295)

Çizelge 6.3. Alternatif uygulayıcılara ait tadilat süresi değerleri

Uygulayıcı	Eylem				
	A1	A2	A3	A4	A5
L1	(12, 15)	(8, 10)	(7, 8)	(7, 10)	(5, 6)
L2	(14, 18)	(9, 10)	(6, 8)	(7, 9)	(4, 7)
L3	(13, 16)	(8, 9)	(7, 9)	(6, 8)	(5, 8)

Eylemlerin binaların kriter bazında puanlarına etki değerleri Çizelge 6.4'de verildiği gibidir.

Çizelge 6.4. Eylemlerin etki değerleri

Eylem	E1		E2		E3	E4	E5
Etkilediği Kriter	K2	K3	K4	K6	K5	K6	K7
B1	(-6, -8)	(-9, -10)	(-8, -9)	(-12, -14)	(-4, -5)	(-8, -10)	(-7, -8)
B2	(-5, -7)	(-15, -16)	(-14, -15)	(-10, -13)	(-13, -16)	(-6, -7)	(-7, -9)
B3	(-12, -15)	(-14, -18)	(-16, -18)	(-15, -16)	(-9, -10)	(-16, -18)	(-20, -22)
B4	(-10, -11)	(-8, -12)	(-6, -7)	(-14, -15)	(-6, -7)	(-11, -12)	(-8, -10)
B5	(-14, -18)	(-13, -16)	(-18, -19)	(-14, -17)	(-13, -16)	(-12, -15)	(-21, -25)
B6	(-16, -19)	(-13, -14)	(-5, -6)	(-6, -9)	(-3, -4)	(-8, -9)	(-6, -7)
B7	(-2, -2)	(0, -2)	(-2, -2)	(0, -1)	(0, -1)	(0, 0)	(0, -1)
B8	(-8, -9)	(-15, -17)	(-5, -7)	(-11, -12)	(-6, -8)	(-6, -9)	(-11, -13)
B9	(-10, -12)	(-4, -6)	(-10, -12)	(-14, -15)	(-1, -2)	(-13, -14)	(-12, -13)
B10	(-7, -9)	(-8, -9)	(-9, -10)	(-7, -8)	(-5, -7)	(-6, -8)	(0, -1)

Sınıflara atamada nesnelerin BEP değerleri doğrusal ayrıştırma fonksiyonu kullanılarak hesaplanacaktır. Bu değeri hesaplamak için ihtiyaç duyulan kriter ağırlıkları Çizelge 6.5'de sınıflara atamak için BEP değer aralıkları ise Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.5. Kriter ağırlıkları

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Ağırlık Değeri	0,27	0,07	0,10	0,16	0,12	0,08	0,20

Çizelge 6.6. Sınıf sınır değerleri

Sınıf	Sınır Değerler
A	BEP $\leq$ 5
B	5 < BEP $\leq$ 10
C	10 < BEP $\leq$ 14
D	14 < BEP $\leq$ 18
E	18 < BEP $\leq$ 22
F	22 < BEP $\leq$ 26
G	26 < BEP $\leq$ 30

Yukarıda verilen problem verileri ile model GAMS paket programında EK-4'de sunulan şekilde kodlanıp CPLEX çözücüsü ile Intel® Core ™ i7-5500U 2,40GHz işlemci ve 8 GB RAM donanıma sahip bir kişisel bilgisayarda farklı üyelik dereceleri için çözülmüştür. Çözüm sonunda elde edilen bütçe harcaması, istenen sınıflara düşen bina sayıları ve hedeflerden sapma değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7. İki hedefli doğrusal ayrıştırma fonksiyonuna dayalı sıralama modelinin sonuçları

	Bütçe harcaması	İstenen sınıflara atanan bina sayısı	d_1^+	d_2^-
μ=1,0	555	7	0	1
μ=0,9	713	7	0	1
μ=0,8	693	7	0	1
μ=0,7	675	7	0	1
μ=0,6	681	7	0	1
μ=0,5	685	7	0	1
μ=0,4	653	7	0	1
μ=0,3	648,5	7	0	1
μ=0,2	667	7	0	1
μ=0,1	664,5	7	0	1
μ=0,0	650	7	0	1

750 birim olarak belirlenen bütçe hedefi çözüm üyeliğinin farklı değerlerinin hiçbirinde aşılmamıştır. Tüm çözümlerde bütçe harcamasının mevcut bütçenin altında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle ilgili hedeften negatif yönlü sapma oluşmuş ve pozitif yönlü sapma oluşmamıştır. Ancak belirli durum da (μ=1,0) dahil olmak üzere tüm üyelik değerleri için istenen sınıflara atanan bina sayısı yedi değerinde kaldığından ikinci hedef

fonksiyonunda 1 birimlik negatif yönlü sapma oluşmuştur. Dolayısıyla 1 birim sapma ile çözümler elde edilmiştir. Bu çözümlerde seçilen eylemler ve binaların atandıkları sınıflar ise Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Doğrusal ayrıştırma fonksiyonuna dayalı sıralama için hedef programlama modeli sonuçları

Üyelik Değeri	Seçilen Eylemler	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
İlk Durum	-	D	E	F	C	F	D	A	D	C	B
μ=1,0	E4 (L2), E5 (L1)	C	D	D	C	E	C	A	C	C	B
μ=0,9	E3 (L2), E4 (L3), E5 (L1)	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
μ=0,8	E3 (L2), E4 (L2), E5 (L1)	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
μ=0,7	E3 (L2), E4 (L2), E5 (L1)	C	D	D	B	D	C	A	C	B	B
μ=0,6	E3 (L2), E4 (L2), E5 (L1)	C	D	D	B	D	C	A	C	C	B
μ=0,5	E3 (L2), E4 (L3), E5 (L1)	C	D	D	C	D	C	A	C	C	B
μ=0,4	E3 (L1), E4 (L2), E5 (L1)	C	D	D	C	D	C	A	C	C	B
μ=0,3	E3 (L1), E4 (L2), E5 (L1)	C	D	D	C	D	C	A	C	C	B
μ=0,2	E3 (L2), E4 (L2), E5 (L1)	C	D	D	C	E	C	A	C	C	B
μ=0,1	E3 (L2), E4 (L2), E5 (L2)	C	D	D	C	E	C	A	C	C	B
μ=0,0	E3 (L1), E4 (L3), E5 (L2)	C	D	D	C	E	C	A	C	C	B

Belirsizlik düzeyine bağlı olarak değişen tadilat maliyeti ve tadilat süresi değerleri binaların atandığı sınıflarda, seçilen tadilat eylemlerinde ve eylem uygulayıcılarında değişikliklere sebep olmaktadır. Örneğin üyelik değerinin 0,7 durumunda B4 ve B9 binaları B sınıfına atanırken, üyelik değerinin 0,5 olduğu durumda C sınıfına atanmışlardır. Bu durum maliyetler, süreler ve eylem etki değerlerinde, üyelik derecesine bağlı olarak oluşan farklı parametre değerlerinin getirdiği çözüm farklılığı olarak açıklanabilir.

Başlangıçta altı bina istenmeyen sınıflarda yer alırken, iyileştirme sonucunda istenmeyen sınıflara düşen bina sayısı üç olarak belirlenmiştir. Hedef değer sekiz olarak belirlendiğinden ikinci hedeften bir bina sapma ile optimum sonuç elde edilmiş, bütçe hedefinin altında maliyetlerle iyileştirme planları geliştirilmiştir.

6.1.2. Örnek problem - 2

Telafi dersi planlayan öğretim üyeleri birden fazla değerlendirme kriterini göz önünde bulundurmak isteyebilirler. Bununla birlikte soru çözme derslerinde bazı durumlarda ders asistanı da derse katkı sağlayabilmektedir. Sınıf başarısı, değerlendirme kriterlerinin ağırlıklı toplamı yoluyla belirlenmektedir. Bu bölümün başında verilen iki hedefli doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile sıralama modeli ders asistanının da katkı sağlayabileceği telafi dersi planlaması uygulamalarında kullanılabilir. Bu amaçla modelin ikinci uygulaması olarak lisans eğitiminde telafi dersi planlaması uygulaması ele alınmıştır.

Eylemleri uygularken soru çözümünde harcanan süre hedef olarak dikkate alınmış olup bu sebeple modelde sistem kısıtlaması olarak verilen zaman kısıtlaması modelden çıkarılmıştır. Birinci hedef olarak ders süresinin 90 dakikayı aşmaması, ikinci hedef olarak ise dersi alan 25 öğrencinin hepsinin CC ve üstü harf notu alması belirlenmiştir. Bunun yanında, ilk hedefte ders süresinin 30 dakikaya kadar artırılabileceği düşünülerek sürenin belirsizliği ele alınmıştır. Soruların çözümü için dersten sorumlu öğretim üyesi ve ders asistanı uygulayıcılar olarak düşünülmüştür.

Öğrencilerin ders konularına mevcut yatkınlık düzeyleri Çizelge 5.6'da, her bir konudan soru çözümünün öğrenci yatkınlıklarına bulanık katkı düzeyleri Çizelge 5.7'de, final sınavı için belirlenmiş her bir konudan sorulacak soru ağırlıkları Çizelge 5.8'de ve her bir harf notu için alınması gereken en düşük puanlar Çizelge 5.9'da verilen değerler olarak kabul edilmiştir. İki uygulayıcının soruları çözme süreleri Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Alternatif uygulayıcılara ait soru çözme süreleri

Uygulayıcı	Eylem					
	E1	E2	E3	E4	E5	E6
L1	(30, 25)	(20, 17)	(25, 15)	(25, 22)	(30, 24)	(25, 23)
L2	(25, 22)	(30, 24)	(20, 18)	(30, 23)	(25, 22)	(30, 25)

Bu uygulamada ilk hedef değerde belirsizlik olması ve kriter değerlerinin fayda temelli olmasından ötürü Eş. 6.2, Eş. 6.8 ve Eş. 6.9'da değişiklikler yapılarak yerlerine sırasıyla, Eş. 6.13, Eş. 6.14 ve Eş. 6.15 ile ifade edilen denklemler kullanılmıştır.

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\tilde{c}_{kl}x_{kl}+d_1^{-}-d_1^{+}=B+30(1-\mu) \tag{6.13}$$

$$\sum_{j=1}^{n}o_{ij}^{'}w_j \geq b^{h+1}-M(1-y_{hi}) \qquad \forall\, i \text{ ve } \forall\, h=1,\ldots,t-1 \tag{6.14}$$

$$\sum_{j=1}^{n}o_{ij}^{'}w_j \leq b^{h}+M(1-y_{hi}) \qquad \forall\, i \text{ ve } \forall\, h=2,\ldots,t \tag{6.15}$$

Model GAMS paket programında kodlanmış CPLEX çözücüsü kullanılarak Intel® Core ™ i7-5500U 2,40GHz işlemci ve 8 GB RAM donanıma sahip bir kişisel bilgisayarda farklı üyelik dereceleri için çözülmüştür. Mevcut durumda ve her bir üyelik derecesi için elde edilen çözüm sonucunda elde edilen sapma değerleri ve hangi eylemin hangi uygulayıcı tarafından gerçekleştirilmesi gerektiği Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.10. İki hedefli sınıf performansı iyileştirme uygulaması sonuçları

Üyelik Değeri	z	d_1^{+}	d_2^{-}	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Mevcut durum	15	0	15						
μ=1,0	6	0	6		L1	L2	L1		L1
μ=0,9	6	0	6	L2	L1	L2		L2	
μ=0,8	6	0	6	L2	L1		L1	L2	
μ=0,7	5	0	5	L2	L1	L2		L2	
μ=0,6	4	0	4	L2	L1	L2		L2	
μ=0,5	4	0	4	L2	L1	L2		L2	
μ=0,4	1	0	1	L2	L1	L2		L2	L1
μ=0,3	1	0	1	L2	L1	L2		L2	L1
μ=0,2	1	0	1	L2	L1	L2		L2	L1
μ=0,1	1	0	1	L2	L1	L2	L1	L2	
μ=0,0	1	0	1	L2	L1	L2	L1		L1

Başlangıçta dersten başarısız görülen öğrenci sayısı on beş olarak verilmiştir. Problem parametrelerinin belirli olduğu durumda (μ=1,0), 2, 3, 4 ve 6 numaralı konulardan dersten sorumlu öğretim üyesi ve ders asistanının çözeceği sorular sayesinde başarısız öğrenci sayısı altıya düşecektir. Üyelik değerinin azalmasına bağlı olarak başarısız öğrenci sayısı bire kadar düşmektedir. Ders süresi ile ilgili hedef değer çözüm üyelik derecesinin tüm değerleri için aşılmamış olup çözümü etkileyecek pozitif yönlü bir sapmayla karşılaşılmamıştır.

Problemlerin çözümünde öğretim üyesi ve ders asistanının belirli sorularda katkı sağladığı görülmektedir.

Öğretim üyesinin üyelik değeri 0,6 olan çözümü uygulaması durumunda öğrenci başarı düzeyleri ve harf notları Çizelge 6.11'de verildiği gibi olacaktır.

Çizelge 6.11. μ=0,6 için öğrencilerin başarı düzeyleri ve harf notları

Öğrenci	İlk Durum		Telafi Dersi Sonrası	
	Başarı Notu	Harf Notu	Başarı Notu	Harf Notu
Ö1	61,8	CC	75,4	BA
Ö2	30,8	FF	52,4	DC
Ö3	88,0	AA	95,2	AA
Ö4	49,1	DD	72,8	BA
Ö5	42,8	DD	63,1	CC
Ö6	31,6	FF	63,5	CC
Ö7	41,1	DD	59,8	CC
Ö8	60,3	CC	64,9	CB
Ö9	56,8	DC	61,8	CC
Ö10	54,3	DC	70,2	BB
Ö11	55,3	DC	65,4	CB
Ö12	79,3	BA	93,4	AA
Ö13	55,1	DC	77,8	BA
Ö14	51,3	DC	65,8	CB
Ö15	33,1	FF	52,8	DC
Ö16	66,8	BB	80,6	BA
Ö17	58,3	DC	73,1	BA
Ö18	63,5	CC	82,7	AA
Ö19	66,3	CB	76,7	BA
Ö20	65,1	CB	83,6	AA
Ö21	63,8	CC	73,4	BA
Ö22	53,0	DC	68,4	BB
Ö23	65,3	CB	73,0	BA
Ö24	29,8	FF	54,5	DC
Ö25	33,3	FF	42,4	DD

Elde edilen çözüm sonuçlarına bakıldığında harf notu AA olan bir öğrenci dışında tüm öğrencilerin harf notlarının iyileştiği görülmektedir. Yalnızca dört öğrencinin harf notları CC'den daha düşük kalmaktadır. Bu sonuçlara göre birden fazla hedefin olduğu durumlarda sınıflandırmayı iyileştirmek için önerilen model kullanılabilir.

Tek amaçlı doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile sıralama modeli için 5.1.2 başlığı altında çözümü sunulan telafi dersi planlama örneği sonuçlarını bu uygulamanın sonuçları ile kıyaslamak için aynı üyelik değeri (μ = 0,5) altında bu modelin çözümü yapılmıştır. Çözüm sonuçları, ilk problemde öğrencilere atanan harf notları ile elde edilen çözüm karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6.12. μ=0,5 için öğrencilerin yatkınlık düzeyleri ve harf notları

Öğrenci	Model – 1 için çözüm		Model – 4 için çözüm	
	Başarı Notu	Harf Notu	Başarı Notu	Harf Notu
Ö1	75,4	BA	75,4	BA
Ö2	52,9	DC	52,9	DC
Ö3	95,5	AA	95,5	AA
Ö4	73,5	BA	73,5	BA
Ö5	64,2	CC	64,2	CC
Ö6	65,7	CB	65,7	CB
Ö7	60,5	CC	60,5	CC
Ö8	65,2	CB	65,2	CB
Ö9	61,9	CC	61,9	CC
Ö10	70,7	BA	70,7	BA
Ö11	65,7	CB	65,7	CB
Ö12	93,4	AA	93,4	AA
Ö13	78,0	BA	78,0	BA
Ö14	66,2	CB	66,2	CB
Ö15	54,2	DC	54,2	DC
Ö16	80,8	BA	80,8	BA
Ö17	74,3	BA	74,3	BA
Ö18	83,3	AA	83,3	AA
Ö19	77,3	BA	77,3	BA
Ö20	84,3	AA	84,3	AA
Ö21	74,7	BA	74,7	BA
Ö22	68,8	BB	68,8	BB
Ö23	73,6	BA	73,6	BA
Ö24	55,4	DC	55,4	DC
Ö25	43,4	DD	43,4	DD

İki model sonuçlarının aynı üyelik değeri için birebir aynı olduğu Çizelge 6.12'de görülmektedir. Bunun nedeni eylemlerin etki düzeylerinin uygulayıcı seçim kararına bağlı olmayıp, eylemin uygulanıp uygulanmamasıyla ilişkili olmasıdır. Dolayısıyla iki modelin ayrıştığı temel noktanın aynı belirsizlik noktasında farklı çözümler getirmek değil, farklı

kararları belirlemek olduğu anlaşılmaktadır. İlk model eylemlerin seçilim seçilmemesiyle ilgilenirken, bu bölümde ele alınan model eylemleri seçmenin yanı sıra hangi uygulayıcı tarafından gerçekleştirileceğini de belirlemeye çalışmaktadır.

6.2. Model – 5: Fayda Fonksiyonuna Dayalı İki Hedefli Sıralama

Karar vericinin eklemeli fayda fonksiyonunu kullanarak sınıfları belirlediği durumda, iyileştirme maliyetinin ve istenen sınıflara düşen nesne sayısının değerlendirme kriteri olduğu kabul edilsin. Eylemlerin tek bir uygulayıcı tarafından gerçekleştirilebileceği, tamamlanma zamanlarının kesin olarak olarak bilindiği ve gerektirdiği kaynak miktarlarının bulanık belirsiz olduğu varsayılsın. Ayrıca, aynı zamanda yalnızca bir eylemin uygulanabileceği düşünülsün. İfade edilen problem bu bölümde modellenmiştir. Hedef programlama yaklaşımından yararlanılan bu modelde, kaynak kullanım sınırından en az miktarda pozitif yönlü sapmaya ve istenen sınıflara düşmüş nesne sayısından en az miktarda negatif yönlü sapmaya sahip iyileştirme planı belirlenmektedir.

Problem parametrelerindeki belirsizliğin yalnızca eylemlerin ihtiyaç duyduğu kaynak miktarlarında olacağı varsayılmıştır. İki hedef için hedef değerlerden en az sapmayı bulmak amaçlanmış ve çözüm için hedef programlama tekniğinden faydalanılmıştır. Modelin matematiksel formülasyonu, modelde yer alan kümeler, parametreler ve karar değişkenlerinin tanımları ile birlikte aşağıda verilmiştir:

Kümeler

i : nesneler

j : kriterler

k : eylemler

l : fayda değer aralıkları

h : sınıflar

Parametreler

$\tilde{c}_k$: k eylemini gerçekleştirmede ihtiyaç duyulan kaynak miktarı

B : toplam kaynak miktarı için bulanık değer

o_{ij} : j kriteri bazında i nesnesinin mevcut durumu

δ_{ijk} : k eyleminin i nesnesine j kriteri bazında etki değeri

v_{jl} : j kriterinin l değer aralığı için birim fayda değeri

g_{jl} : j kriterinin l değer aralığı için alt sınır değeri

b^h : h sınıfına ait üst sınır değeri

M : yeterince büyük bir sayı

Karar değişkenleri

$o_{ij}^{'}$: j kriteri bazında i nesnesinin yeni durumu

$u_j\left(o_i^{'}\right)$: i nesnesinin j kriteri fayda değeri

d_1^+ : birinci hedeften pozitif yönlü sapma miktarı

d_1^- : birinci hedeften negatif yönlü sapma miktarı

d_2^+ : ikinci hedeften pozitif yönlü sapma miktarı

d_2^- : ikinci hedeften negatif yönlü sapma miktarı

$$x_k = \begin{cases} 1, k \text{ eylemi uygulanırsa} \\ 0, \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$y_{hi} = \begin{cases} 1, i \text{ nesnesi } h \text{ grubuna atanmışsa} \\ 0, \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$zx_{kijl} = \begin{cases} 1, k \text{ eylemi uygulandığında } i \text{ nesnesi } j \text{ kriteri için } l \text{ aralığına giriyorsa} \\ 0, \text{ diğer durumda} \end{cases}$$

$$z_{ijl} = \begin{cases} 1, i \text{ nesnesi } j \text{ kriteri için } l \text{ aralığına giriyorsa} \\ 0, \text{ diğer durumda} \end{cases}$$

Matematiksel model

$$enk\ d_1^+ + d_2^- \tag{6.16}$$

kısıtlar

$$\sum_{k=1}^{K} \tilde{c}_k x_k + d_1^- - d_1^+ = B \tag{6.17}$$

$$\sum_{h=1}^{h_{istenen}} \sum_{i=1}^{m} y_{hi} + d_2^- - d_2^+ = C \tag{6.18}$$

$$o_{ij}^{'} = o_{ij} + \sum_{k=1}^{m} \delta_{ijk} x_k \qquad \forall i, j \qquad (6.19)$$

$$\sum_{h=1}^{t} y_{hi} = 1 \qquad \forall i \qquad (6.20)$$

$$o_{ij}^{'} \geq g_j^l - M(1 - z_{ijl}) \qquad \forall i, j \text{ ve } \forall l = 2, ..., s_j \qquad (6.21)$$

$$o_{ij}^{'} \leq g_j^{l+1} + M(1 - z_{ijl}) \qquad \forall i, j \text{ ve } \forall l = 1, ..., s_j - 1 \qquad (6.22)$$

$$\sum_{l=1}^{s_j+1} z_{ijl} = 1 \qquad \forall i, j \qquad (6.23)$$

$$u_j\left(o_i^{'}\right) = \sum_{l=1}^{s_j} \sum_{a=1}^{l-1} \left[v_{ja} + \frac{o_{ij} - g_j^l}{g_j^{l+1} - g_j^l} v_{jl} \right] z_{ijl} + \sum_{l=1}^{s_j} \sum_{k=1}^{m} \left[\frac{\tilde{\delta}_{ijk} zx_{kijl}}{g_j^{l+1} - g_j^l} v_{jl} \right] + \sum_{l=1}^{s_j+1} v_{jl} z_{ij(s_j+1)} \qquad \forall i, j \qquad (6.24)$$

$$zx_{kijl} \leq x_k \qquad \forall k, i, j, l \qquad (6.25)$$

$$zx_{kijl} \leq z_{ijl} \qquad \forall k, i, j, l \qquad (6.26)$$

$$zx_{kijl} \geq x_k + z_{ijl} - 1 \qquad \forall k, i, j, l \qquad (6.27)$$

$$\sum_{j=1}^{n} u_j\left(o_i^{'}\right) \geq b^{h-1} - M(1 - y_{hi}) \qquad \forall i \text{ ve } \forall h = 2, ..., t \qquad (6.28)$$

$$\sum_{j=1}^{n} u_j\left(o_i^{'}\right) \leq b^{h} + M(1 - y_{hi}) \qquad \forall i \text{ ve } \forall h = 1, ..., t - 1 \qquad (6.29)$$

$$x_k \in \{0,1\} \qquad \forall k \qquad (6.30)$$

$$y_{hi} \in \{0,1\} \qquad \forall h, i \qquad (6.31)$$

$$z_{ijl} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j, l \qquad (6.32)$$

$$zx_{kijl} \in \{0,1\} \qquad \forall k, i, j, l \qquad (6.33)$$

$$d_1^-, d_1^+, d_2^-, d_2^+ \geq 0 \qquad (6.34)$$

Eş. 6.16'da verilen modelin amaç fonksiyonu istenen sınıflara atanmış nesne sayısının hedef değerden negatif yönlü sapması ile kullanılabilir kaynak miktarı üzerinde harcanan kaynak miktarı toplamını en küçüklemeyi hedeflemektedir. Kaynak kullanımı ve sınıflara atanmış nesne sayılarına ilişkin hedef kısıtları sırası ile Eş. 6.17 ve Eş. 6.18'de verilmiştir. Nesnenin

seçilen eylemler sonucunda oluşan yeni kriter bazında puanları Eş. 6.19 ile hesaplanmaktadır. Nesnelerin bir sınıfa atanması zorunluluğu Eş. 6.20 ile verilmektedir. Eş. 6.21, Eş. 6.22 ve Eş. 6.23 nesnenin kriter bazında puanlarının tek bir fayda değer aralığına düşebileceğini ve bunun kriter bazında değer aralığı alt sınırı ile kıyaslanarak belirlendiğini göstermektedir. Eklemeli fayda fonksiyonunun doğrusal hâle dönüştürülmüş şekli Eş. 6.24'de gösterilmiştir. Eş. 6.25, Eş. 6.26 ve Eş. 6.27'de verilen kısıtlar eklemeli fayda fonksiyonu doğrusal hâle getirilirken ihtiyaç duyulan ek karar değişkenlerinin aralarındaki ilişkileri ifade etmektedir. Eş. 6.28 ve Eş. 6.29'da verilen kısıtlar nesnenin yeni durumdaki fayda değerini hesaplayarak hangi sınıfa atanacağını belirlemeyi sağlamaktadır. Eylemlerin seçimi ve nesnelerin sınıflara atanma durumlarını ifade eden karar değişkenleri için işaret kısıtları sırasıyla Eş. 6.30 ve Eş. 6.31'de, eklemeli fayda fonksiyonunda kullanılan ek karar değişkenlerinin işaret kısıtları Eş. 6.32 ve Eş. 6.33'de ve sapma değişkenlerinin işaret kısıtları Eş. 6.34'de belirtilmiştir.

6.2.1. Örnek problem – 1

İki hedefli doğrusal ayrıştırma fonksiyonu için çözülen bina enerji verimi iyileştirme örneği, eylem etkilerinin belirli olduğu varsayımı ile bu modelin uygulamasında kullanılmıştır. Eylemlerin belirliliği durumunda etki değerleri ve eylem maliyetleri Çizelge 6.13'de verilmiştir.

Çizelge 6.13. Eylemlerin etki ve maliyet değerleri

Eylem	E1		E2		E3	E4	E5
Etkilediği Kriter	K2	K3	K4	K6	K5	K6	K7
B1	-8	-10	-9	-14	-5	-10	-8
B2	-7	-16	-15	-13	-16	-7	-9
B3	-15	-18	-18	-16	-10	-18	-22
B4	-11	-12	-7	-15	-7	-12	-10
B5	-18	-16	-19	-17	-16	-15	-25
B6	-19	-14	-6	-9	-4	-9	-7
B7	0	-2	0	0	-1	0	-1
B8	-9	-17	-7	-12	-8	-9	-13
B9	-12	-6	-12	-15	-2	-14	-13
B10	-9	-9	-10	-8	-7	-8	-1
Eylem Maliyeti	(300, 450)		(700, 800)		(100, 125)	(200, 240)	(250, 300)

Problemin fayda değer aralıkları, her bir aralıktaki birim fayda değerleri ve sınıflara atama için kullanılan fayda değer aralıkları olarak Çizelge 5.26, Çizelge 5.27 ve Çizelge 5.28'de verilen değerler kullanılmıştır. Bütçe hedefinin 750, bina sayısı hedefinin 8 olduğu durum için model GAMS paket programında EK-5'de verildiği şekilde kodlanmış, CPLEX çözücüsü yardımıyla elde edilen çözümler Çizelge 6.14 ve Çizelge 6.15'de verilmiştir.

Çizelge 6.14. İki hedefli eklemeli fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modeli sonuçları

Üyelik Değeri	Bütçe harcaması	İstenen sınıflara atanan bina sayısı	d_1^+	d_2^-
μ=1.0	575	7	0	1
μ=0.9	435	7	0	1
μ=0.8	652	7	0	1
μ=0.7	633	7	0	1
μ=0.6	515	7	0	1
μ=0.5	487,5	7	0	1
μ=0.4	740	8	0	0
μ=0.3	717,5	8	0	0
μ=0.2	695	8	0	0
μ=0.1	677,5	8	0	0
μ=0.0	650	8	0	0

Çizelge 6.15. Her bir üyelik değeri için seçilen eylemler ve bina sınıfları

Üyelik Değeri	Seçilen Eylemler	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
İlk Durum	-	C	D	E	C	F	D	A	C	C	B
μ=1,0	A1, A3	C	D	D	C	D	C	A	C	C	A
μ=0,9	A1	C	D	D	C	E	C	A	C	C	B
μ=0,8	A1, A4	C	D	D	B	E	C	A	C	C	A
μ=0,7	A1, A4	C	D	D	B	E	C	A	C	C	A
μ=0,6	A1, A3	C	D	D	C	D	C	A	C	C	A
μ=0,5	A1, A3	C	D	D	C	D	C	A	C	C	A
μ=0,4	A1, A3, A5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,3	A1, A3, A5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,2	A1, A3, A5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,1	A1, A3, A5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A
μ=0,0	A1, A3, A5	C	C	D	B	D	C	A	C	C	A

Belirsizlik düzeyine bağlı olarak değişen tadilat maliyeti değerleri binaların atandığı sınıflarda ve seçilen tadilat eylemlerinde değişikliklere sebep olmaktadır. Örneğin üyelik değerinin 0,8 olduğu durumda B sınıfında olan B4 binası, üyelik değerinin 0,6 olduğu durumda C sınıfına düşmüştür. Bu durum, değişen üyelik değeri sebebiyle eylem maliyetlerinin ve seçilen eylemin değişmesinden kaynaklanmıştır.

Başlangıçta dört bina istenmeyen sınıflarda yer alırken, iyileştirme sonucunda istenmeyen sınıflara düşen bina sayısı üç olarak belirlenmiştir. İstenen sınıflara düşen bina sayısı hedefi sekiz olarak belirlendiğinden üyelik değerinin deterministik durum olan μ=1,0 değerinden μ=0,5 değerine kadar olan çözümlerde ikinci hedeften bir bina sapma ile, diğer çözümlerde sapmasız olarak optimum sonuç elde edilmiş, bütçe hedefinin altında maliyetlerle iyileştirme planları geliştirilmiştir. Belirsizlik düzeyine bağlı olarak farklı eylemlerin seçildiği ve bina sınıflarında değişimler olduğu gözlenmiştir.

6.2.2. Örnek problem - 2

Araştırma merkezlerinin elde edebileceği fon ve altyapı kaynakları, yayın performansı düzeyiyle doğrudan ilişkilidir. Bu bölümde tek amaçlı eklemeli fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modelinin örneği olarak verilen yayın taslağı kalitesi iyileştirme uygulaması, ekip direktörünün beş yayın taslağını yayınlanabilir düzeye getirmeyi ve iyileştirme için harcanacak çalışma kapasitesinin yetmiş adam günü geçmemesini hedeflediği varsayılarak çözülmüştür.

Yayın taslaklarının mevcut durumda kriter bazında puanları Çizelge 5.31'de, her bir kriter için fayda değer aralıkları Çizelge 5.32'de, bu aralıklar için birim fayda değerleri Çizelge 5.33'te ve eylemlerin etki düzeyleri Çizelge 5.34'te verilen değerler olarak kabul edilmiştir. Belirsizliğin söz konusu olduğu eylemler için gerekli işgücü kaynağı miktarları ise Çizelge 6.16'da verilmiştir.

Çizelge 6.16. Eylemler için gerekli kaynak değerleri

Eylem	E1	E2	E3	E4
Gereken İşgücü (adam gün)	(40, 32)	(15, 8)	(20, 12)	(50, 40)

Bu örnekte de yayın taslaklarının yayınlanamaya değer bulunması için fayda düzeyinin 0,75'e eşit veya daha fazla olması, düzeltme gerekir düzeyde bulunması için fayda düzeyinin 0,60 veya daha yukarıda olması gerekmektedir. Daha düşük fayda değerine sahip çalışmalar yayınlanamaz olarak değerlendirilecektir.

Problemin Carlsson ve Korhonen'in bulanık çözüm yaklaşımına göre çözümü için, model GAMS paket programında kodlanmadan önce problem fayda temelli kriter değerleri içerdiği için Eş. 6.28 ve Eş. 6.29'da ifade edilen sınıf belirleme kısıtlarında Eş. 6.35 ve Eş. 6.36 ile verilen değişiklikler yapılmıştır.

$$\sum_{j=1}^{n} u_j\left(o_i^{'}\right) \geq b^h - M(1-y_{hi}) \qquad \forall\, i \text{ ve } \forall h = 1,\ldots,t-1 \qquad (6.35)$$

$$\sum_{j=1}^{n} u_j\left(o_i^{'}\right) \leq b^{h+1} + M(1-y_{hi}) \qquad \forall i \text{ ve } \forall\, h = 2,\ldots,t \qquad (6.36)$$

Yapılan değişikliklerden sonra GAMS paket programında kodlanan model CPLEX çözücüsü kullanılarak Intel® Core ™ i7-5500U 2,40GHz işlemci ve 8 GB RAM donanıma sahip bir kişisel bilgisayarda çözdürülmüştür. Yapılan koşturumlar sonucunda farklı üyelik değerleri için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ve seçilen iyileştirme eylemleri Çizelge 6.17'de sunulmuştur.

Çizelge 6.17. Yayın taslağı iyileştirme örneği için çözüm sonuçları

Üyelik Değeri	Amaç Fonksiyonu	Eylem			
	z	E1	E2	E3	E4
Mevcut durum	5				
μ=1,0	3	√	√		
μ=0,9	3	√	√		
μ=0,8	2,6		√		√
μ=0,7	1		√		√
μ=0,6	1		√		√
μ=0,5	1		√		√
μ=0,4	1		√		√
μ=0,3	1		√		√
μ=0,2	1		√		√
μ=0,1	1		√		√
μ=0,0	0		√	√	√

Başlangıç durumunda yayın taslaklarının hiçbiri yayınlanabilir durumda değil iken, belirsizlik düzeyinin artışı ile eylemlerin gerektirdiği işgücü azaldığından sapmalar azalmış ve hedeflere yaklaşılmıştır. Deterministik durumu gösteren üyelik derecesinin 1 olduğu durum, 0,9 üyelik derecesine sahip durumla denk çıkmıştır, bu noktadan sonra sapma değerleri azalarak üyeliğin sıfır olduğu durumda sapmasız çözüme ulaşılmıştır. Üyelik derecesi 0,9 olan çözüm için nesnelerin son durumları ve fayda değerlerine bağlı olarak yayın taslaklarının atandığı sınıflar Çizelge 6.18'de verilmiştir.

Çizelge 6.18. μ=0,9 için nesnelerin yeni durumları ve sınıf atamaları

Yayın	Kriter					Fayda Değeri	Sınıf
	K1	K2	K3	K4	K5		
Y1	7,90	9,60	9,80	8,70	6,30	0,778	Yayınlamaya değer
Y2	9,00	9,10	9,10	8,50	5,90	0,754	Yayınlamaya değer
Y3	4,30	8,60	8,60	3,10	8,40	0,610	Düzeltme gerekir
Y4	7,60	8,60	9,00	7,20	6,40	0,704	Düzeltme gerekir
Y5	6,80	7,60	8,10	5,70	5,50	0,575	Yayınlanamaz
Y6	7,20	9,00	9,00	8,80	5,60	0,696	Düzeltme gerekir
Y7	5,20	7,90	8,70	5,00	4,20	0,500	Yayınlanamaz
Y8	4,60	7,80	7,40	4,10	6,50	0,502	Yayınlanamaz
Y9	7,00	8,60	8,40	7,70	7,90	0,731	Düzeltme gerekir
Y10	6,10	8,10	8,50	7,00	5,00	0,584	Yayınlanamaz

Karar vericinin %10 belirsizliğe göre yapacağı bir iyileştirme planında başlangıçta hiçbir yayın taslağı yayınlanabilir durumda değilken, uygulanacak iki iyileştirme eylemi ile bir yayın taslağı yayınlamaya değer düzeye gelecektir. Bunun için yayın taslaklarının sayısal analizlerin genişletilmesi ve dil düzenlemesi eylemlerinin uygulanmasına ihtiyaç vardır. Bu durumda yayın hedefinden negatif yönlü 3 birim sapma ve işgücü kapasitesi hedefinden negatif yönlü 6,5 adam gün sapma oluşacak ve 58,5 adam günlük işgücünün tahsis edilmesi ile bu duruma ulaşılacaktır.

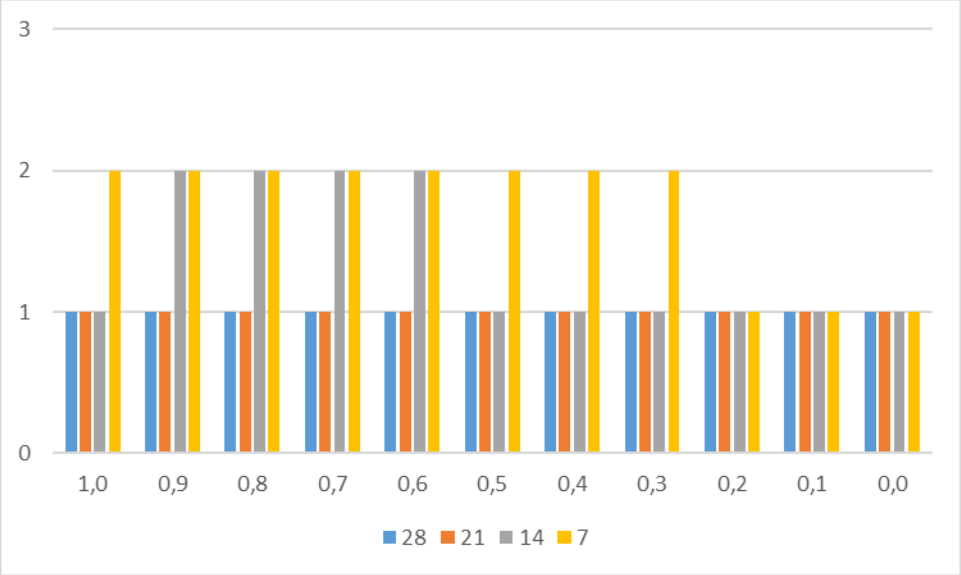
7. DUYARLILIK ANALİZİ

Duyarlılık analizi dinamik ortamda, yani gerçek hayattaki değişimlerde modelin hangi durumlarda stabil olduğunun görülmesini sağlar. Taha'ya göre duyarlılık analizi, optimum çözümün dinamik davranışları üzerinde durmamızı sağlayan etkin bir hesaplama yöntemidir [69].

İki hedefli bina enerji verimi iyileştirme örneği için süre kısıtındaki tolerans sabit kalacak şekilde süre limiti değerindeki değişimin çözüm değerine etkisini incelemek için bir duyarlılık analizi çalışması gerçekleştirilmiştir. 21 gün olan süre kısıtı 7, 14 ve 28 gün olarak değiştiğinde çözüm üyeliğine bağlı olarak elde edilen çözüm değerleri Çizelge 7.1'de sunulmuştur.

Çizelge 7.1. Süre kısıt değeri değişiminin amaç fonksiyonu değerine etkisi

Model 4 - Örnek 1	Üyelik Değeri										
Süre Kısıtı	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
7	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1



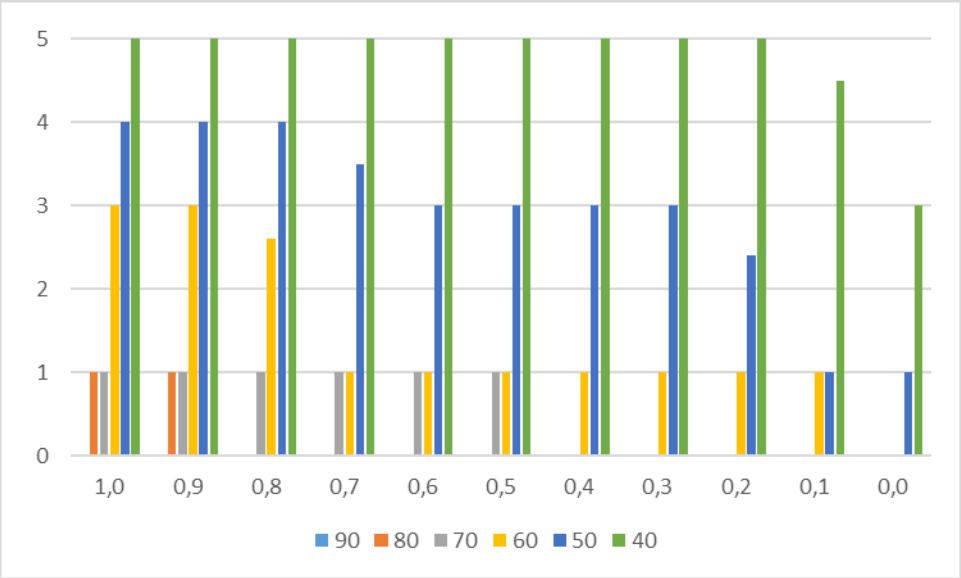
Şekil 7.1. Süre kısıtlamasının farklı değerleri için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

Çizelgede sunulan çözüm sonuçları, iyileştirme eylemleri için verilen 21 günlük süreyi artırmanın çözümü iyileştirmek için etkili olmayacağını göstermektedir. Yani, süre kısıtlamasından ötürü yapılamayan bir eylem nedeniyle hedef değerlerden sapma oluşması söz konusu değildir. Ancak sürenin kısaltılarak 14 güne indirilmesi, amaç fonksiyonu değerinin 2'ye yükselmesine sebep olmuştur. 21 günlük süre kısıtı altında nesneler üzerinde daha büyük etkiler sağlayacak eylemlerin tanımlanması yoluyla sapmasız çözümlere ulaşmak bu analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır.

İki hedefli yayın taslağı kalitesi iyileştirme örneği için işgücü kapasitesi hedefi değeri değişiminin çözüm değerine etkisini incelemek için bir duyarlılık analizi çalışması gerçekleştirilmiştir. 60 adam gün olan hedef değer 40. 50, 70, 80 ve 90 gün olarak değiştiğinde çözüm üyeliğine bağlı olarak elde edilen çözüm değerleri Çizelge 7.2'de sunulmuştur.

Çizelge 7.2. Hedef değer değişiminin amaç fonksiyonu değerine etkisi

Model 5 - Örnek 2	Üyelik Değeri										
İşgücü Kapasitesi	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
60	3	3	2,6	1	1	1	1	1	1	1	0
50	4	4	4	3,5	3	3	3	3	2,4	1	1
40	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4,5	3



Şekil 7.2. İşgücü kapasitesinin farklı değerleri için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri

Çizelgede sunulan çözüm sonuçları, iyileştirme eylemleri için verilen 70 adam gün olarak belirlenen kapasiteyi artırmanın çözümü iyileştirmek için faydalı olacağını ve kapasite hedefinin çözümü etkilediğini göstermektedir. Yani, kapasite hedefinden sapma olmaması adına, modelin yapılabilecek iyileştirmeleri sapmalı çözüm elde etmemek adına seçmediği gözlenmektedir. Kapasite azaltıldığında ise, çözüm değerleri daha da kötüleşmekte ve parametrelerin muhtemel değerlerinin hiçbir noktasında sapmasız bir çözüme ulaşılamamaktadır. Bu analiz, çözümü iyileştirmek için ekip direktörüne daha fazla kapasite tahsis etmenin yarar sağlayabileceğini göstermektedir.

Bulanık mantık belirsizliğin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Diğer belirsizlik modelleme araçlarına göre en temel üstünlüğü; geçmiş veriye ihtiyaç duymayıp, karar vericinin uzmanlığına bağlı olarak parametre değer aralıklarını belirlemeye imkan sağlamasıdır. Bu çalışmada önerilen modellerin çözümünde kullanılan Carlsson ve Korhonnen'in bulanık çözüm yaklaşımı ile Vergeday'ın bulanık çözüm yaklaşımı, belirsiz parametreler için monoton artan veya monoton azalan olacak şekilde parametre değer aralıkları kullanmaktadır. Dolayısıyla karar vericinin, parametre ile ilgili kesin olarak gerçekleşecek ve gerçekleşmesi mümkün olmayan değer aralığına ilişkin değerleri modele girmesi çözümü elde etmek için yeterlidir. Karar problemlerinde belirsizlik farklı parametrelerde karar vericinin karşısına çıkabilir. Karar vericinin sadece kaynak miktarlarında belirsizlikle karşılaştığı durumda Vergeday'ın çözüm yaklaşımı problemin çözümüne ulaşmada yeterliyken, belirsizliğin amaç fonksiyonu katsayılarında ve kısıt

katsayılarında da olması halinde Carlsson ve Korhonnen'in çözüm yaklaşımı kullanılarak çözüm elde edilebilir.

Optimizasyon çalışmalarında parametre değerlerinin kesin olarak bilindiği varsayımı altında çözümler elde edilmektedir. Ancak gerçek hayatta her zaman belirsizlik söz konusudur. Bu nedenle belirli varsayımlar altında elde edilecek tek bir sonuç yerine bu çalışmada kullanılan yöntemlerde olduğu gibi parametrelerin belirli toleranslar dahilinde belirsiz olduğu durum için elde edilen çözümler, karar vericilerin gerçek yaşamda optimizasyon sonuçlarını karar destek aracı olarak kullanmalarını daha mümkün kılacaktır. Bu tez çalışmasında geliştirilen modeller, ters çok kriterli sıralama problemi için bulanık belirsizliği içeren ve sıralama sonuçları için birden fazla değerlendirme kriterinin olduğu durumları dikkate alan ilk modellerdir. Sıralama sonuçlarının farklı yönlerden eş zamanlı olarak iyileştirilmesi ve istatistiki verilerin elde edilmesinin güç olduğu, özellikle eylem etki değerlerindeki belirsizliğin uzman görüşlerine dayandırılması düşüncesi farklı alanlarda sınıflandırma çalışmalarına yol gösterici olacaktır.

Ele alınan TÇKSP konusunda hâlihazırda yapılmış çalışmalarda, iyileştirme eylemleriyle ilgili yalnızca bütçe veya istenen nesne sınıflarıyla alakalı sınırlamalar vardır. Bu tez çalışmasının literatüre yaptığı katkılardan biri olarak, geliştirilen modellerde ve örnek uygulamalarda eylemlerin tamamlanma süreleriyle ilgili kısıtlamalar ve farklı uygulayıcıların iyileştirme eylemlerini gerçekleştirme durumu gibi yeni problem varsayımları dikkate alınmıştır. Bu yönlerden de modellerin sınıflandırılması söz konusu olan nesneler içeren sistemlerde yapılacak iyileştirmeleri planlayan karar vericilere yeni modeller geliştirme açısından yol gösterecektir.

Gelecek çalışmalarda sunulan modeller için geçmiş gerçek verilerin mevcut olduğu farklı uygulamalar geliştirilerek stokastik veya gri modelleme yaklaşımları ile çözüm aranabilir. Ayrıca geçmiş veriye dayalı belirsizlik aralıkları oluşturularak ilgili aralık için en kötü durumda elde edilecek sonuç sağlam (robust) optimizasyon yaklaşımlarıyla çözülebilir. Yeterli veriye ulaşıldığı durumda parametreler için istatistiki veriler belirlenerek modeller geliştirilebilir.

Belirsizliğin artması problem verilerini gevşetmektedir. Bu sayede düşük üyelik değerlerinde daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu durum, Vergeday'ın çözüm

yaklaşımında daha net görülmesine karşın Carlsson ve Korhonen'in çözüm yaklaşımının uygulandığı problemlerde kısıt sol tarafında da belirsizlik olduğu için düzgün bir değişimin gözlenmesi garanti edilemez. Düşük üyelik dereceleri, gerçekten uzak sonuçlara götürürken; yüksek üyelik dereceleri daha kötü ama gerçeğe daha yakın sonuçlar sunmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sınıflandırma problemleri eğitim, sağlık, üretim ve enerji gibi pek çok alanda sıklıkla çalışılmaktadır. Literatürde sınıflandırma uygulamaları, sınıflar arasında tercih sıralaması olup olmadığına göre sınıflandırma ve sıralama problemleri olarak iki grupta ele alınmaktadır. Nesnelerin sınıflara atanması için birden fazla kriterin birlikte değerlendirilmesi gerektiğinden sınıflandırma problemleri çok kriterli bakış açısıyla ele alınmaktadır. Birden fazla kriteri değerlendirebilmek için matematiksel modeller, çok kriterli karar verme teknikleri ve veri madenciliği yöntemleri gibi farklı tekniklerle sınıflandırma yapabilmek mümkündür. İstenen sınıflandırmayı gerçekleştirmek için uygulanması gereken eylemleri belirlemeye çalışan Ters Çok Kriterli Sıralama Problemi'nde mümkün çözümler arasında seçime yol gösteren amaç fonksiyonu, eylem tanımlamaları ve kullanılacak sıralama yaklaşımına göre farklı matematiksel modeller oluşturulabilir.

Bu tez çalışmasında, Ters Çok Kriterli Sıralama Problemi için problem parametrelerinin bulanık belirsizlik içerdiği durumu ele alan tek ve iki amaçlı toplam beş yeni model önerilmiştir. Önerilen modellerden ilk üçü tek amaçlı modellerdir. İlk model, istenmeyen sınıflara atanmış nesne sayısını en küçüklemeyi amaçlamakta ve doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile nesne sınıflarını belirlemektedir. İkinci model, istenen sınıflara en fazla sayıda nesne atanmasını amaçlamakta, doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile nesne sınıflarını belirlemekte ve eylemleri gerçekleştirmek için farklı uygulayıcıların tercih edilebileceği varsayımlarını içermektedir. Üçüncü modelde, eklemeli fayda fonksiyonu ile sınıflar belirlenmekte ve istenen sınıflardaki nesne sayısının en fazla olması amaçlanmaktadır.

Önerilen diğer iki model ise, iki amaç fonksiyonu ile değerlendirilecek durumlar için önerilmiştir. Bu modellerde amaç fonksiyonları için hedef değerlerden en az düzeyde sapmaya sahip uzlaşık çözümlerin belirlenmesi için hedef programlama yaklaşımından yararlanılmıştır. İki amaçlı durumlara yönelik modellerden ilkinde, eylemleri gerçekleştirebilecek birden fazla uygulayıcının bulunduğu ve doğrusal ayrıştırma fonksiyonu ile sınıfların belirlendiği bir problem modellenmiştir. İkinci modelde ise, eylemlerin tek bir uygulayıcı tarafından gerçekleşebileceği ve sınıfların eklemeli fayda fonksiyonu ile belirlendiği varsayılmıştır.

Parametre belirsizlikleri açısından önerilen modellere bakıldığında, dört modelde kısıt katsayılarında ve sağ taraf değerlerindeki belirsizlik ele alınmış ve Carlsson ve Korhonen tarafından önerilen bulanık çözüm yaklaşımı ile farklı üyelik dereceleri için optimum çözümler belirlenmiştir. Tek amaçlı fayda fonksiyonuna dayalı sıralama modelinde ise, belirsizliğin yalnızca kısıt kaynak vektöründe olması durumu göz önünde bulundurulmuş ve Vergeday'ın bulanık çözüm yaklaşımı ile çözümler elde edilmiştir.

Önerilen beş modelin her biri için örnek problem çözülerek değişen belirsizlik düzeyine göre problem sonuçları yorumlanmıştır. Beş modelin hepsi için bina enerji verimi etiketlerinin iyileştirilmesi problemi çözülmüştür. Bu problemin yanı sıra, lisans eğitiminde sınıf başarısını iyileştirme, oteller zinciri yöneticileri için sahip olunan otellerin kalitesinin artırılması, araştırma yayın taslaklarının yayınlanabilir düzeye getirilmesi problemleri üzerinden önerilen modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Ters Çok Kriterli Sıralama Problemi literatürde oldukça yeni bir konu olduğundan, gelecek araştırmalar için pek çok yönden üzerine çalışılmaya değer olarak görülebilir. Önerilen modellerin farklı alanlara uygulanabilmesi için, gelecek çalışmalarda yeni uygulama alanlarına özgü kısıtlayıcılar ve amaç fonksiyonları tanımlanabilir.

Problemin çeşitli parametrelerindeki belirsizliklerin modellenmesi için farklı bulanık çözüm yaklaşımlarından faydalanılabileceği gibi, belirsizlik modellemede kullanılan stokastik modeller ve gri teori gibi diğer yaklaşımlarla da yeni modeller geliştirilebilir. Belirsizlik altında karar verme konusuna ilgi duyan araştırmacılar açısından, problemi bu yönleriyle ele almak ilgi uyandırabilecek araştırma yönleri olarak düşünülebilir.

Bunun yanında, modellerin performansını değerlendirmek için problem boyutundaki değişimin çözüm zamanlarına etkisi incelenebilir. Problemin makul çözüm zamanlarında optimum çözümü bulamadığı durumlar için sezgisel veya metasezgisel çözüm yaklaşımları kullanan çalışmalar geliştirilebilir.

Son olarak, önerilen modellerde eylemlerin seçilmesi kararları belirlenmektedir. İyileştirme düzeylerini belirleyecek karar değişkenleri içeren yeni modellerin geliştirilmesi de gelecekte yapılacak çalışmalarda ele alınabilecek bir konu olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Belahcène, K., Labreuche, C., Maudet, N., Mousseau, V., Ouerdane, W. (2016). An efficient SAT formulation for learning multiple criteria non-compensatory sorting rules from examples. *Computers and Operations Research*, 97, 58–71.

2. Silva, M. M., Costa, A. P. C. S., de Gusmão, A. P. H. (2014). Continuous cooperation: A proposal using a fuzzy multicriteria sorting method. *International Journal of Production Economics*, 151, 67–75.

3. Angilella, S., Mazzù, S. (2019). A credit risk model with an automatic override for innovative small and medium-sized enterprises. *Journal of the Operational Research Society*, 70(10), 1784-1800.

4. Corrente, S., Doumpos, M., Greco, S., Słowinski, R. Zopounidis, C. (2017). Multiple criteria hierarchy process for sorting problems based on ordinal regression with additive value functions. *Annals of Operations Research*, 251, 117–139.

5. Shen, F., Xu, J., Xu, Z. (2016). An outranking sorting method for multi-criteria group decision making using intuitionistic fuzzy sets. *Information Sciences*, 334–335, 338–353.

6. Corrente, S., Figueira, J. R., Greco, S., Słowiński, R. (2017). A robust ranking method extending ELECTRE III to hierarchy of interacting criteria, imprecise weights and stochastic analysis, *Omega*, 73, 1-17.

7. Heravi, G., Fathi, M. Faeghi, S. (2017). Multi-criteria group decision-making method for optimal selection of sustainable industrial building options focused on petrochemical projects. *Journal of Cleaner Production*, 142(4), 2999-3013.

8. Lai, Y. L., Hwang, C. L. (1992). *Fuzzy Mathematical Programming Methods and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, s. 74-186.

9. Zopounidis, C., Doumpos, M. (2002). Multi criteria classification and sorting methods: a literature review. *European Journal of Operations Research*, 138(2), 229–246.

10. Karsu, O. (2016). Approaches for inequity-averse sorting. *Computers and Operations Research*, 66, 67-80.

11. Çelik, B., Karasakal, E., İyigün, C. (2015). A probabilistic multiple criteria sorting approach based on distance functions. *Expert Systems with Applications*, 42, 3610–3618.

12. Brusco, M. J., Voorhees, C. M., Calantone, R. J., Brady, M. K., Steinley, D. (2019). Integrating linear discriminant analysis, polynomial basis expansion, and genetic search for two-group classification. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 48(6), 1623-1636.

13. Ben-Romdhane, H., Ouarda, T. B. M. J., Marpu, P., Rajan, A., Bugla, I., Perry, R. J. O., Ghedira, H. (2020). Studying coral reef patterns in UAE waters using panel data analysis and multinomial logit and probit models. *Ecological Indicators*, 112, 106050.

14. Tuşa, L., Kern, M., Khodadadzadeh, M., Blannin, R., Gloaguen, R., Gutzmer, J. (2020). Evaluating the performance of hyperspectral short-wave infrared sensors for the pre-sorting of complex ores using machine learning methods. *Minerals Engineering*, 146, 106150.

15. Singh, V., Mohan Rao, S. (2005). Application of image processing and radial basis neural network techniques for ore sorting and ore classification. *Minerals Engineering*, 18, 1412–1420.

16. Zopounidis, C., Doumpos, M. (1999). A Multicriteria Decision Aid Methodology for Sorting Decision Problems: The Case of Financial Distress. *Computational Economics*, 14, 197–218.

17. Brito, A. J., de Almeida, A. T., Mota, C. M. M. (2010). A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. *European Journal of Operational Research*, 200, 812–821.

18. Kadzinski, M., Słowinski, R. (2013). DIS-CARD: a new method of multiple criteria sorting to classes with desired cardinality. *Journal of Global Optimiza*tion, 56, 1143-1166.

19. Köksalan, M., Mousseau, V., Özpeynirci, Ö., Bilgin Özpeynirci, S. (2009). A new outranking-based approach for assigning alternatives to ordered classes. *Naval Research Logistics*, 56, 74–85.

20. Ishizaka, A., Pereira, V. (2020). Utilisation of ANPSort for sorting alternative with interdependent criteria illustrated through a researcher's classification problem in an academic context. *Soft Computing*, 24(18), 13639–13650.

21. Özpeynirci, S., Özpeynirci, Ö., Mousseau, V. (2018). An interactive algorithm for multiple criteria constrained sorting problem. *Annals of Operations Research*, 267, 447-466.

22. de Morais Bezerra, F., Melo, P., Costa, J. P. (2017). Reaching Consensus with VICA-ELECTRE TRI: A Case Study. *Group Decision and Negotiation*, 26(6), 1145–1171.

23. Fontana, M. E., Cavalcante, C. A. V. (2013). ELECTRE TRI method used to storage location assignment into categories. *Pesquisa Operacional*, 33(2), 283–303.

24. Kadzinski, M., Martyn, K., Cinelli, M., Słowinski, R., Corrente, S., Greco, S. (2020). Preference disaggregation for multiple criteria sorting with partial monotonicity constraints: Application to exposure management of nanomaterials. *International Journal of Approximate Reasoning*, 117, 60–80.

25. Pelissari, R., Oliveira, M. C., Amor, S. B., Abackerli, A. J. (2019). A new FlowSort-based method to deal with information imperfections in sorting decision-making problems. *European Journal of Operational Research*, 276, 235–246.

26. Sabokbar, H., Hosseini, A., Banaitis, A., Banaitiene, N. (2016). A novel sorting method TOPSIS-SORT: an application for Tehran environmental quality evaluation. *Ekonomie a Management*, 19(2), 87–104.

27. Kadzinski, M., Greco, S., Słowinski, R. (2014). Robust Ordinal Regression for Dominance-based Rough Set Approach to multiple criteria sorting. *Information Sciences*, 283, 211–228.

28. de Lima Silva, D.F., de Almeida Filho, A.T. (2020). Sorting with TOPSIS through boundary and characteristic profiles. *Computers & Industrial Engineering*, 141, 106328.

29. Palha, R. P., de Almeida, A. T., Morais, D. C., Hipel, K. W. (2019). Sorting Subcontractors' Activities in Construction Projects with a Novel Additive-Veto Sorting Approach. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(4), 306–321.

30. Ferreira, L., Borenstein, D., Righi, M. B., de Almeida Filho, A. T. (2018). A fuzzy hybrid integrated framework for portfolio optimization in private banking. *Expert Systems with Applications*, 92, 350–362.

31. Mousseau, V., Özpeynirci, Ö., Özpeynirci, S. (2018). Inverse multiple criteria sorting problem. *Annals of Operations Research*, 267, 379-412.

32. Özpeynirci, Ö., Mousseau, V., Özpeynirci, S. (2015, 9-11 Eylül). *Ters Çok Amaçlı Sınıflandırma Problemleri*. Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği 35. Ulusal Kongresinde sunuldu, Ankara.

33. Wang, T. R., Pedroni, N., Zio, E., Mousseau, V. (2020). Identification of Protective Actions to Reduce the Vulnerability of Safety-Critical Systems to Malevolent Intentional Acts: An Optimization-Based Decision-Making Approach. *Risk Analysis*, 40(3), 565-587.

34. Ecer, B., Kabak, M., Dağdeviren, M. (2020). İki amaçlı ters çok kriterli sıralama problemi için hedef programlama modeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4) , 1729-1736.

35. Özpeynirci, Ö., Özpeynirci, S., Mousseau, V. (baskıda). An interactive approach for inverse multiple criteria sorting problem. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, https://doi.org/10.1002/mcda.1719.

36. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.

37. Ecer, B., Aktas, A., Kabak, M., Dağdeviren, M. (2020). Determining the Best Maternity Hospital by Using a Fuzzy Decision Making Model. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 6(1), 7-12.

38. Keller, A. A. (2018). Chapter 1 - Elements of Mathematical Optimization. A. A. Keller (Editör*), Mathematical Optimization Terminology*. Londra: Academic Press, 1-12.

39. Minoux, M. (1986). *Mathematical programming: theory and algorithms*. Hoboken: Wiley.

40. Kocadağlı, O. (2006). *Bulanık Matematiksel Programlama ve Portföy Analizi Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

41. Leung, Y. (1988). *Spatial Analysis and Planning under lmprecision*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 184-232.

42. Luhandjula, M.K. (1989). Fuzzy optimization an appraisal. *Fuzzy Sets and Systems*, 30, 257- 282.

43. Prasad, R.V., Rajesh, R., Thirumalaikumarasamy, D. (2020). Selection of coating material for magnesium alloy using Fuzzy AHP-TOPSIS. *Sādhanā*, 45, 23.

44. Rahiminezhad Galankashi, M., Mokhatab Rafiei, F., Ghezelbash, M. (2020). Portfolio selection: a fuzzy-ANP approach. *Financial Innovation*, 6, 17.

45. Narayanamoorthy, S., Annapoorani, V., Kang, D., Baleanu, D. Jeon, J., Kureethara, J. V., Ramya, L. (2020). A novel assessment of bio-medical waste disposal methods using integrating weighting approach and hesitant fuzzy MOOSRA. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122587.

46. Ramirez-Atencia, C., Rodriguez-Fernandez, V., Camacho, D. (2020). A revision on multi-criteria decision making methods for multi-UAV mission planning support. *Expert Systems with Applications*, 160, 113708.

47. Majumder, P., Biswas, P., Majumder, S. (2020). Application of New TOPSIS Approach to Identify the Most Significant Risk Factor and Continuous Monitoring of Death of COVID-19. *Electronic Journal of General Medicine*, 17(6), em234.

48. Salih, M. M., Zaidan, B. B., Zaidan, A. A. (2020). Fuzzy decision by opinion score method. *Applied Soft Computing*, 96, 106595.

49. Sharma, M., Joshi, S., Kannan, D., Govindan, K., Singh, R., Purohit, H.C. (2020). Internet of Things (IoT) adoption barriers of smart cities' waste management: An Indian context. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122047.

50. Mahdiyar, A., Mohandes, S. R., Durdyev, S., Tabatabaee, S., Ismail, S. (2020). Barriers to green roof installation: An integrated fuzzy-based MCDM approach. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122365.

51. Wang, R., Li, X., Xu, C., Li, F. (2020). Study on location decision framework of electric vehicle battery swapping station: Using a hybrid MCDM method, *Sustainable Cities and Society*, 61, 102149.

52. Madhu, P., Sowmya Dhanalakshmi, C., Mathew, M. (2020). Multi-criteria decision-making in the selection of a suitable biomass material for maximum bio-oil yield during pyrolysis. *Fuel*, 277, 118109.

53. Avikal, S., Singhal, R., Sajwan, R., Kumar Tiwari, R., Singh, R. Selection of Best Power Supply Source for Telecom Towers in Remote Areas. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 5(5), 913-925.

54. Nyimbili, P. H., Erden, T. (2020). GIS-based fuzzy multi-criteria approach for optimal site selection of fire stations in Istanbul, Turkey. *Socio-Economic Planning Sciences*, 71, 100860.

55. Afolayan, A.H., Ojokoh, B.A., Adetunmbi, A.O. (2020). Performance analysis of fuzzy analytic hierarchy process multi-criteria decision support models for contractor selection. *Scientific African*, 9, e00471.

56. Agarwal, S. S., Kansal, M. L. (2020). Risk based initial cost assessment while planning a hydropower Project. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100517.

57. Hameed, H. B., Ali, Y., Petrillo, A. (2020). Environmental risk assessment of E-waste in developing countries by using the modified-SIRA method. *Science of the Total Environment*, 733, 138525.

58. Karuppiah, K., Sankaranarayanan, B., Ali, S. M., Chowdhury, P., Paul, S. K. (2020). An integrated approach to modeling the barriers in implementing green manufacturing practices in SMEs. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121737.

59. Wu, Y., Wu, C., Zhou, J., He, F., Xu, C., Zhang, B., Zhang, T. (2020). An investment decision framework for photovoltaic power coupling hydrogen storage project based on a mixed evaluation method under intuitionistic fuzzy environment, *Journal of Energy Storage*, 30, 101601.

60. Şahin, M. (2020). Hybrid Multicriteria Group Decision-Making Method for Offshore Location Selection Under Fuzzy Environment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 6887–6909.

61. Rouyendegh, B. D., Yildizbasi, A., Yilmaz, I. (2020). Evaluation of retail industry performance ability through integrated intuitionistic fuzzy TOPSIS and data envelopment analysis approach. *Soft Computing*, 24(16), 12255-12266.

62. Roozbahani, A., Ghased, H., Shahedany, M. H. (2020). Inter-basin water transfer planning with grey COPRAS and fuzzy COPRAS techniques: A case study in Iranian Central Plateau, *Science of The Total Environment*, 726, 138499.

63. Budak, A., Kaya, İ., Karaşan, A., Erdoğan, M. (2020). Real-time location systems selection by using a fuzzy MCDM approach: An application in humanitarian relief logistics, *Applied Soft Computing*, 92, 106322.

64. Carlsson, C., Korhonen, P. (1986). A parametric approach to fuzzy linear programming. *Fuzzy Sets and Systems*, 20, 17-30.

65. Verdegay, J.L. (1982). Fuzzy mathematical programming, M. M. Gupta ve E. Sanchez. (Editörler). *Fuzzy Information and Decision Processes*, Amsterdam. Elsevier Science Publishers, 231-237.

66. Dent, W., Jagannathan, R., Rao, M. (1973). Parametric linear programming: some special cases. *Naval Research Logistics Quarterly*, 20(4), 725-728.

67. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği. (5 Aralık 2008). *Resmi Gazete*.

68. Kabak, M., Köse, E., Kırılmaz, O., Burmaoğlu, S. (2014). A fuzzy multi-criteria decision making approach to assess building energy performance. *Energy and Buildings*, 72, 382–389.

69. Taha, H. A. (2007). Operations Research: An Introduction. Pearson: New Jersey, ABD.

EKLER

EK-1. Model – 1 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
sets i binalar /b1*b10/
    h sınıflar /1*7/
    k eylemler /a1*a5/
    j kriter /c1*c7/;
scalar uyelik /1.0/;
parameters
        c(k) eylem maliyeti /a1 300, a2 700, a3 100, a4 200, a5 250/
        b(h) sınıf alt sınırı /1 5, 2 10, 3 14, 4 18, 5 22, 6 26, 7 30/
        w(j) kriter ağırlığı /c1 0.27, c2 0.07, c3 0.10, c4 0.16, c5 0.12, c6 0.08, c7 0.20/
        crange(k) maliyet aralık /a1 150, a2 100, a3 25, a4 40, a5 50/
        Budget bütçe /750/
        sigma(i,j,k) /
                b1.c2.a1=-6
                …
                b10.c7.a5=0
               /
sigmarange(i,j,k) /
                b1.c2.a1=-2
                …
                b10.c7.a5=-1
               / ;
table o(i,j) mevcut durum
…
;
variable z;
binary variables x(k)
            y(h,i);
positive variable oyeni(i,j);
equations amac, yenidurum, butce, atama, sinif1, sinif2;
amac.. z=e=sum(h$(ord(h) ge 4),sum(i,y(h,i)));
yenidurum(i,j).. oyeni(i,j)=e=o(i,j)+sum(k,(sigma(i,j,k)+sigmarange(i,j,k)*uyelik)*x(k));
butce.. sum(k,(c(k)+crange(k)*uyelik)*x(k))=l=Budget;
```

EK-1. (devam) Model – 1 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
atama(i).. sum(h,y(h,i))=e=1;
sinif1(i,h)$(ord(h) ne 1).. sum(j,oyeni(i,j)*w(j))=g=b(h-1)-1000*(1-y(h,i));
sinif2(i,h)$(ord(h) ne 7).. sum(j,oyeni(i,j)*w(j))=l=b(h)+1000*(1-y(h,i));
model m1u1 /all/;
solve m1u1 using mip minimizing z;
m1u1.optcr=0.00;
display x.l, oyeni.l, y.l;
```

EK-2. Model – 2 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
sets i binalar /b1*b10/
    h sınıflar /1*7/
    k eylemler /a1*a5/
    j kriter /c1*c7/
    l uygulayıcı /l1*l3/;
scalar uyelik /1.0/;
parameters
        b(h) sınıf alt sınırı /1 5, 2 10, 3 14, 4 18, 5 22, 6 26, 7 30/
        w(j) kriter ağırlığı /c1 0.27, c2 0.07, c3 0.10, c4 0.16, c5 0.12, c6 0.08, c7 0.20/
        Budget bütçe /210/
        Budgetrange /60/
        Time zaman /15/
        Timerange /5/
        sigma(i,j,k) /
                b1.c2.a1=-7
               …
                b10.c7.a5=-11
               /
sigmarange(i,j,k) /
                b1.c2.a1=-2
               …
                b10.c7.a5=-2
               / ;
table o(i,j) mevcut durum
…
;
table c(k,l) eylem maliyeti
…
;
table crange(k,l) maliyet aralık
…
;
```

EK-2. (devam) Model – 2 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
table t(k,l) eylem süresi
…
;
table trange(k,l) süre aralık
…
;
variable z;
binary variables x(k,l)
                 y(h,i);
positive variable oyeni(i,j);
integer variable ctg(l), ct;
equations amac, butce, yenidurum, tekuyg, atama, sinif1, sinif2, zaman1, zaman2, zaman3;
amac.. z=e=sum(h$(ord(h) le 3),sum(i,y(h,i)));
butce..          sum((k,l),(c(k,l)+crange(k,l)*(1-uyelik))*x(k,l))=l=Budget+budgetrange*(1-
uyelik);
yenidurum(i,j)..                 oyeni(i,j)=e=o(i,j)+sum(k,(sigma(i,j,k)+sigmarange(i,j,k)*(1-
uyelik))*sum(l,x(k,l)));
tekuyg(k).. sum(l,x(k,l))=l=1;
atama(i).. sum(h,y(h,i))=e=1;
sinif1(i,h)$(ord(h) ne 1).. sum(j,oyeni(i,j)*w(j))=g=b(h-1)-1000*(1-y(h,i));
sinif2(i,h)$(ord(h) ne 7).. sum(j,oyeni(i,j)*w(j))=l=b(h)+1000*(1-y(h,i));
zaman1(l).. sum(k,(t(k,l)+trange(k,l)*(1-uyelik))*x(k,l))=l=ctg(l);
zaman2(l).. ct=g=ctg(l);
zaman3.. ct=l=Time+Timerange*(1-Uyelik);
model m2u1 /all/;
solve m2u1 using mip maximizing z;
m2u1.optcr=0.00;
display x.l, oyeni.l, y.l;
```

EK-3. Model – 3 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
sets i binalar /b1*b10/
    h sınıflar /1*7/
    k eylemler /a1*a5/
    j kriter /c1*c7/
    l aralık /1*8/;
alias (l,a);
scalar uyelik /1.0/;
 parameters c(k) eylem maliyeti /a1 300, a2 700, a3 100, a4 200, a5 250/
        t(k) süre /a1 12, a2 8, a3 6, a4 6, a5 4/
        b(h) sınıf alt sınırı /1 0.040, 2 0.100, 3 0.240, 4 0.500, 5 0.650, 6 0.759, 7 1/
        Budget bütçe /750/
        Zaman tadilat süresi /21/
        sigma(i,j,k)  /
                b1.c2.a1=-8
…
                b10.c7.a5=-1
               /  ;
table o(i,j) mevcut durum
…
;
table v(j,l) aralıklar
…
;
table g(j,l) alt sınırlar
…
;
variable z;
binary variables x(k)
            y(h,i)
            zi(i,j,l)
            zx(k,i,j,l);
positive variable fayda(i,j)
```

EK-3. (devam) Model – 3 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
        oyeni(i,j)
        ;
equations amac, yenidurum, butce, zamansinir, atama, yenizidonusum1, yenizidonusum2,
tekaralik, faydafonk, xzxiliski, zizxiliski, xzizxiliski, sinif1, sinif2;
amac.. z=e=sum(h$(ord(h) le 3),sum(i,y(h,i)));
yenidurum(i,j).. oyeni(i,j)=e=o(i,j)+sum(k,sigma(i,j,k)*x(k));
butce.. sum(k,c(k)*x(k))=l=Budget+250*(1-uyelik);
zamansinir.. sum(k,t(k)*x(k))=l=Zaman+7*(1-uyelik);
atama(i).. sum(h,y(h,i))=e=1;
yenizidonusum1(i,j,l)$(ord(l) ne 1).. oyeni(i,j)=g=g(j,l)-1000*(1-zi(i,j,l));
yenizidonusum2(i,j,l)$(ord(l) le 7).. oyeni(i,j)=l=g(j,l+1)+1000*(1-zi(i,j,l));
tekaralik(i,j).. sum(l,zi(i,j,l))=e=1;
faydafonk(i,j).. fayda(i,j)=E=sum(l$(ord(l) ne 8),(sum(a$(ord(a) le (ord(l)-
1)),v(j,a)*zi(i,j,l)))+(o(i,j)-g(j,l))/(g(j,l+1)-g(j,l))*v(j,l)*zi(i,j,l))+sum(l$(ord(l) ne
8),sum(k,(sigma(i,j,k)*zx(k,i,j,l))/(g(j,l+1)-g(j,l))*v(j,l)))+sum(l,v(j,l)*zi(i,j,'8'));
xzxiliski(k,i,j,l).. zx(k,i,j,l)=l=x(k);
zizxiliski(k,i,j,l).. zx(k,i,j,l)=l=zi(i,j,l);
xzizxiliski(k,i,j,l).. zx(k,i,j,l)=g=x(k)+zi(i,j,l)-1;
sinif1(i,h)$(ord(h) ne 1).. sum(j,fayda(i,j))=g=b(h-1)-1000*(1-y(h,i));
sinif2(i,h)$(ord(h) ne 7).. sum(j,fayda(i,j))=l=b(h)+1000*(1-y(h,i));
model m3u1 /all/;
solve m3u1 using mip maximizing z;
m3u1.optcr=0.000;
display X.L, y.l, fayda.l, oyeni.l;
```

EK-4. Model – 4 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
sets i binalar /b1*b10/
    h sınıflar /1*7/
    k eylemler /a1*a5/
    j kriter /c1*c7/
    l uygulayıcı /l1*l3/;
scalar uyelik /1.0/;
parameters
        b(h) sınıf alt sınırı /1 5, 2 10, 3 14, 4 18, 5 22, 6 26, 7 30/
        w(j) kriter ağırlığı /c1 0.27, c2 0.07, c3 0.10, c4 0.16, c5 0.12, c6 0.08, c7 0.20/
        Budget bütçe /750/
        Hedef bina sayısı /8/
        Time zaman /21/
        Timerange /7/
        sigma(i,j,k) /
                b1.c2.a1=-6
                …
                b10.c7.a5=0
               /
sigmarange(i,j,k) /
                b1.c2.a1=-2
                …
                b10.c7.a5=-1
               / ;
table o(i,j) mevcut durum
…
;
table c(k,l) eylem maliyeti
…
;
table crange(k,l) maliyet aralık
…
;
```

EK-4. (devam) Model – 4 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
table t(k,l) eylem süresi
…
;
table trange(k,l) süre aralık
…
;
variable z;
binary variables x(k,l)
                 y(h,i);
positive variable oyeni(i,j), d1a, d1e, d2a, d2e;
equations amac, yenidurum, binahedef, butce, zaman, tekuyg, atama, sinif1, sinif2;
amac.. z=e=d1a+d2e;
butce.. sum((k,l),(c(k,l)+crange(k,l)*uyelik)*x(k,l))+d1e-d1a=e=Budget;
binahedef.. sum(h$(ord(h) le 3),sum(i,y(h,i)))+d2e-d2a=e=Hedef;
zaman.. sum((k,l),(t(k,l)+trange(k,l)*uyelik)*x(k,l))=l=Time+Timerange*(1-uyelik);
yenidurum(i,j)..
oyeni(i,j)=e=o(i,j)+sum(k,(sigma(i,j,k)+sigmarange(i,j,k)*uyelik)*sum(l,x(k,l)));
tekuyg(k).. sum(l,x(k,l))=l=1;
atama(i).. sum(h,y(h,i))=e=1;
sinif1(i,h)$(ord(h) ne 1).. sum(j,oyeni(i,j)*w(j))=g=b(h-1)-1000*(1-y(h,i));
sinif2(i,h)$(ord(h) ne 7).. sum(j,oyeni(i,j)*w(j))=l=b(h)+1000*(1-y(h,i));
model m4u1 /all/;
solve m4u1 using mip minimizing z;
m4u1.optcr=0.00;
display x.l, oyeni.l, y.l;
```

EK-5. Model – 5 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
sets i binalar /b1*b10/
    h sınıflar /1*7/
    k eylemler /a1*a5/
    j kriter /c1*c7/
    l aralık /1*8/;
alias (l,a);
scalar uyelik /1.0/;
parameters c(k) eylem maliyeti /a1 300, a2 700, a3 100, a4 200, a5 250/
        crange(k) maliyet aralık /a1 150, a2 100, a3 25, a4 40, a5 50/
        Hedef binahedef /8/
        b(h) sınıf alt sınırı /1 0.040, 2 0.100, 3 0.240, 4 0.500, 5 0.650, 6 0.759, 7 1/
        Budget bütçe /750/
        sigma(i,j,k)  /
                b1.c2.a1=-8
                …
                b10.c7.a5=-1
               /
;
table o(i,j) mevcut durum
…
;
table v(j,l) aralıklar
…
;
table g(j,l) alt sınırlar
…
;
variable z;
binary variables x(k)
            y(h,i)
            zi(i,j,l)
            zx(k,i,j,l);
```

EK-5. (devam) Model – 5 için ilk örnek problemin GAMS kodu

```
positive variable fayda(i,j)
                  oyeni(i,j)
                  d1a
                  d1e
                  d2a
                  d2e;
equations amac, yenidurum, butce, binahedef, atama, yenizidonusum1, yenizidonusum2,
tekaralik, faydafonk, xzxiliski, zizxiliski, xzizxiliski, sinif1, sinif2;
amac.. z=e=d1a+d2e;
butce.. sum(k,(c(k)+crange(k)*uyelik)*x(k))+d1e-d1a=e=Budget;
binahedef.. sum(h$(ord(h) le 3),sum(i,y(h,i)))+d2e-d2a=e=Hedef;
yenidurum(i,j).. oyeni(i,j)=e=o(i,j)+sum(k,sigma(i,j,k)*x(k));
atama(i).. sum(h,y(h,i))=e=1;
yenizidonusum1(i,j,l)$(ord(l) ne 1).. oyeni(i,j)=g=g(j,l)-1000*(1-zi(i,j,l));
yenizidonusum2(i,j,l)$(ord(l) le 7).. oyeni(i,j)=l=g(j,l+1)+1000*(1-zi(i,j,l));
tekaralik(i,j).. sum(l,zi(i,j,l))=e=1;
faydafonk(i,j).. fayda(i,j)=E=sum(l$(ord(l) ne 8),(sum(a$(ord(a) le (ord(l)-
1)),v(j,a)*zi(i,j,l)))+(o(i,j)-g(j,l))/(g(j,l+1)-g(j,l))*v(j,l)*zi(i,j,l))+sum(l$(ord(l) ne
8),sum(k,(sigma(i,j,k)*zx(k,i,j,l))/(g(j,l+1)-g(j,l))*v(j,l)))+sum(l,v(j,l)*zi(i,j,'8'));
xzxiliski(k,i,j,l).. zx(k,i,j,l)=l=x(k);
zizxiliski(k,i,j,l).. zx(k,i,j,l)=l=zi(i,j,l);
xzizxiliski(k,i,j,l).. zx(k,i,j,l)=g=x(k)+zi(i,j,l)-1;
sinif1(i,h)$(ord(h) ne 1).. sum(j,fayda(i,j))=g=b(h-1)-1000*(1-y(h,i));
sinif2(i,h)$(ord(h) ne 7).. sum(j,fayda(i,j))=l=b(h)+1000*(1-y(h,i));
model m5u1 /all/;
solve m5u1 using mip minimizing z;
m5u1.optcr=0.000;
display X.L, y.l, fayda.l, oyeni.l;
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: ECER AKTAŞ, Billur
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 27.07.1988, Ankara
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (312) 906 23 21
e-mail	: becer@ybu.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2014
Lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2011
Lise	Çankaya Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-2014	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınlar

1. Ecer, B., Aktas, A., Dağdeviren, M., Kabak, M. (2018, 7-11 Mart). A New Integer Programming Model for Inverse Multiple Criteria Sorting Problem. 2nd International Conference on Engineering Technology and Innovation'da sunuldu, Budapeşte.

2. Antunes, C. H., Alves M. J., Ecer B. (baskıda). Bilevel optimization to deal with demand response in power grids: models, methods and challenges. *TOP*, https://dx.doi.org/10.1007/s11750-020-00573-y.

3. Ecer, B., Kabak, M., Dağdeviren, M. (2020). İki amaçlı ters çok kriterli sıralama problemi için hedef programlama modeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4) , 1729-1736.

4. Ecer, B., Aktaş, A., Kabak, M., Dağdeviren, M. (2020). Determining the Best Maternity Hospital by Using a Fuzzy Decision Making Model. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 6(1), 7-12.

5. Ecer, B., Dağdeviren, M., Kabak, M. (2019). Energy Efficiency Improvement of Buildings by Using Linear Programming. *Journal for Facility Management*, 18, 38-50.

6. Ecer, B., Aktaş, A. (2019). Clustering of European Countries in terms of Healthcare Indicators. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 5(1), 23-26.

7. Ecer, B., Aktaş, A., Kabak, M. (2019). AHP – Binary Linear Programming Approach for Multiple Criteria Real Estate Investment Planning. *Journal of Turkish Operations Management*, 3(2), 283-289.

8. Ecer, B., Aktaş, A., Kabak, M. (2019). Green Supplier Selection of a Textile Manufacturer: A Hybrid Approach based on AHP and VIKOR. *MANAS Journal of Engineering*, 7(2), 126-135.

Hobiler

Seyahat, Yüzme, Psikoloji



GAZİ GELECEKTİR...