



## A multi-objective mathematical programming model for a novel capability-based university course timetabling problem

Kemal Subulan\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Dokuz Eylül University, 35397, İzmir, Türkiye

### Highlights:

- Capability-based course timetabling approach
- A novel mixed-integer non-linear program
- Compromise timetables

### Keywords:

- University course timetabling problem
- Mixed integer non-linear programming
- Multi-objective optimization
- Capability-based approach
- Compromise programming

### Article Info:

Research Article  
Received: 15.11.2023  
Accepted: 19.03.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1391236

### Correspondence:

Author: Kemal Subulan  
e-mail:  
kemal.subulan@deu.edu.tr  
phone: +90 232 301 76 24

### Graphical/Tabular Abstract

University course timetabling is a tactical-level problem that almost all academic departments encounter before each semester. In order to meet some standards, set by educational accreditation agencies within the scope of higher education quality assurance, it is necessary to generate efficient schedules that ensure optimal distribution of basic capabilities that are aimed to be acquired by students. These capabilities should be specified based on the learning outcomes defined by lecturers for each course, which are also associated with program outcomes. Based on this motivation, this study introduces a novel capability-based course timetabling approach as shown in Figure A for the first time in the literature.

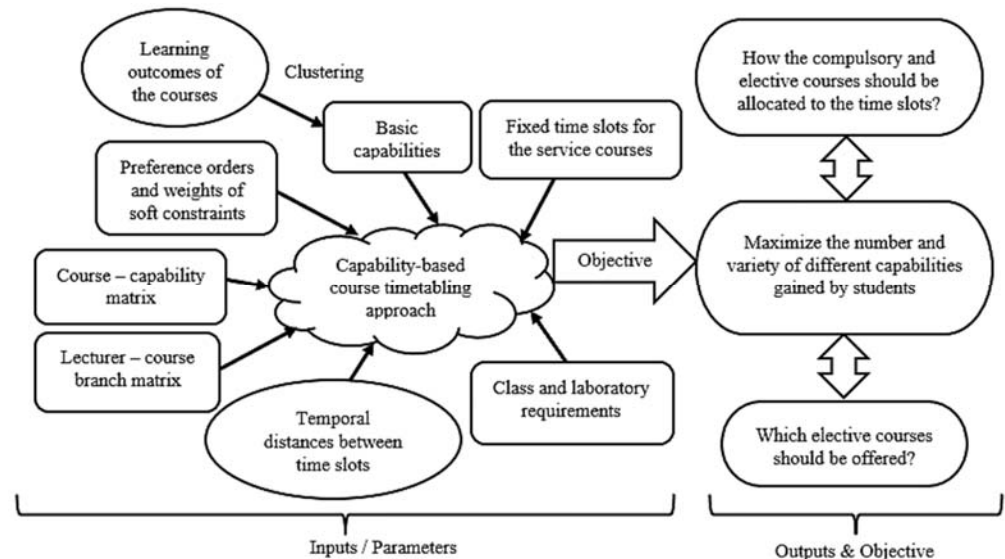


Figure A. The summary of the proposed capability-based course timetabling approach

### Purpose:

The aim of this study is to introduce a novel capability-based course timetabling approach that ensures the optimal distribution of several basic capabilities (i.e., obtained from clustering the learning outcomes of all the courses) targeted to be acquired by the students over the course timetable.

### Theory and Methods:

A multi-objective mixed-integer non-linear programming model is first developed for the problem. Then, the linearization of the proposed model is carried out, and compromise programming and fuzzy goal programming techniques are also applied to produce compromise solutions.

### Results:

An average of 13.11%, 29.54%, 50.33% and 44.77% improvements are achieved in terms of optimal capability distribution, total number of different capabilities that could be gained by students, satisfying expectations of lecturers and the total penalty cost of soft constraints, respectively.

### Conclusion:

The superiority of the proposed approach is also tested on a real-life application in an Industrial Engineering (IE) Department. Significant improvements are achieved in terms of the conflicting objectives.



## Yeni bir yetenek tabanlı üniversite ders zaman çizelgeleme problemi için çok amaçlı bir matematiksel programlama modeli

Kemal Subulan\*<sup>ID</sup>

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 35397, Buca, İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yetenek tabanlı ders zaman çizelgeleme yaklaşımı
- Yeni bir karışık tamsayı doğrusal olmayan programlama modeli
- Uzlaşık ders zaman çizelgeleri

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.11.2023

Kabul: 19.03.2024

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1391236

#### Anahtar Kelimeler:

Üniversite ders zaman çizelgeleme problemi, karma tamsayı doğrusal olmayan matematiksel programlama, çok amaçlı eniyileme, yetenek tabanlı yaklaşım, uzlaşık programlama

#### ÖZ

Üniversite ders zaman çizelgeleme, hemen hemen tüm akademik birimlerin her yarıyıl öncesinde çözüm üretmesi gereken taktiksel seviyede bir problemdir. Günümüzde, Yüksek Öğretim kalite güvencesi kapsamında çeşitli eğitim programı değerlendirme/akreditasyon kuruluşlarının belirlediği standartları sağlamak amacıyla, akademik birimlerin tanımladığı program çıktılarının tüm öğrencilere kazandırılabilmesi için bu çıktılarla ilişkilendirilen ve her ders için öğretim üyeleri tarafından tanımlanan öğrenim çıktıları/kazanımları dikkate alınarak temel teknik yeteneklerin belirlenmesi ve bu yeteneklerin ders programında en iyi şekilde dağıtımını sağlayan etkin ve efektif ders programlarının hazırlanması gerekmektedir. Bu araştırma motivasyonuna dayanarak bu çalışmada, yeni bir yetenek tabanlı ders programı hazırlama yaklaşımı bilimsel yazında ilk defa ele alınarak; problemin çözümü için çok amaçlı, doğrusal olmayan bir karma tamsayı eniyileme modeli geliştirilmiştir. Modelin doğruluğu ve geçerliliği, bir Endüstri Mühendisliği (EM) Bölümü'ne ait bahar yarıyılına ilişkin bir gerçek hayat uygulaması üzerinde test edilmiştir. Uzlaşık programlama ve bulanık hedef programlama tekniklerinden elde edilen uzlaşık ders programları, geçmiş yıllara ait mevcut ders programları ile karşılaştırıldığında, çelişen çeşitli hedefler (Ders programı üzerinde en iyi yetenek dağıtımının sağlanması, öğrencilere maksimum sayıda ve çeşitte farklı temel yeteneklerin kazandırılması, öğretim üyelerinin tercihleri doğrultusunda derslerin atandığı periyotlar arasındaki toplam zamansal farkın en küçüklüklenerek beklenti/isteklerinin karşılanması, esnek kısıtların ihlal edilmesi durumunda maruz kalınan ceza maliyeti) açısından önemli ölçüde iyileştirmelerin sağlanabildiği ortaya konulmuştur.

## A multi-objective mathematical programming model for a novel capability-based university course timetabling problem

### H I G H L I G H T S

- Capability-based course timetabling approach
- A novel mixed-integer non-linear program
- Compromise timetables

#### Article Info

Research Article

Received: 15.11.2023

Accepted: 19.03.2024

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1391236

#### Keywords:

University course timetabling problem, mixed integer non-linear programming, multi-objective optimization, capability-based approach, compromise programming

#### ABSTRACT

The university course timetabling is a tactical level problem that almost all academic departments encounter before each semester. Nowadays, in order to meet some standards, set by educational accreditation agencies within the scope of higher education quality assurance, it is required to generate efficient course timetables, which ensure optimal distribution of basic capabilities. Actually, these capabilities should be first specified based on the learning outcomes defined by lecturers for each course that are also associated with program outcomes and are aimed to be acquired by all of the students. Based on this motivation, a multi-objective mixed-integer non-linear programming model is developed for a novel capability-based course timetabling problem. Its validity and practicality are tested on a real-life application in an Industrial Engineering Department. When the balanced solutions provided by compromise and fuzzy goal programming techniques were compared with the existing schedules of the previous years, it was revealed that significant improvements could be achieved in terms of several conflicting objectives (i.e., optimal capability distribution over the timetable, acquisition of maximum number/variety of different capabilities by the students, meeting expectations of lecturers by minimizing total temporal difference between the periods his/her courses are assigned, total penalty cost related to soft constraints).

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*kemal.subulan@deu.edu.tr / Tel: +90 232 301 7624

## 1. Giriş (Introduction)

Üniversite ders zaman çizelgeleme, üniversitelerdeki hemen hemen tüm akademik birimlerin her yarıyıl öncesi karşılaştığı taktiksel seviyede bir problemdir [1]. Bu problemin çözümü ve etkin/efektif ders programlarının hazırlanması amacıyla, birçok akademik birimde ders programı hazırlama komisyonu kurulmuştur. Bu komisyon, genellikle üst birimler (Fakülte, Enstitü, Yüksekokul vs.) tarafından ders programındaki yeri önceden sabitlenen ortak zorunlu dersleri ve servis dersleri için bölüm dışından gelen öğretim üyelerinin diğer bölümlerdeki ders programlarını öncelikli olarak dikkate alıp, bölüm öğretim üyelerinin gün/saat tercihleri doğrultusunda gerekli tüm kısıt ve koşulları (Örneğin, öğretim üyelerinin derslerinin çakışmaması, maksimum derslik sayısı kısıtı, vb.) sağlayan olurlu bir çözüm üretmeye çalışmaktadır. Ancak günümüzde, çeşitli eğitim programları değerlendirme/akreditasyon denekleri ve Yüksek Öğretim kalite güvence kuruluşlarının belirlediği standartları sağlamak amacıyla, akademik birim/bölümlerin tanımladığı program çıktılarının bölümün tüm öğrencilerine kazandırılabilmesi için program çıktılarıyla ilişkilendirilen ve her ders için dersin öğretim üyesi tarafından tanımlanan öğrenim çıktıları/kazanımları ve ders içerikleri dikkate alınarak, ders programlarının hazırlanması ihtiyacı doğmaktadır. Diğer bir deyişle, ilgili bölümde verilen derslerin benzer öğrenim çıktılarının gruplandırılması ile elde edilebilecek temel yeteneklerin, tüm öğrencilere kazandırılabilmesi için bu yeteneklerin ders programı üzerinde en iyi şekilde dağıtımının yapılması ve maksimum sayıda yeteneği kazandırmaya yönelik olarak açılması gereken seçmeli ders sayısının ve bu derslerin neler olacağına ilişkin etkin bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Açılacak seçmeli derslerin belirlenmesinin yanı sıra, seçmeli ve zorunlu derslerin kazandırmayı hedeflediği yeteneklerin örtüşmesini de dikkate alarak, bu derslerin ders programındaki mevcut zaman periyotlarına en iyi şekilde atamasının yapılması önem arz etmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada ele alınan ana araştırma soruları, (i) Öğrencilerin lisans eğitimi sonunda maksimum sayıda ve çeşitte farklı teknik yetenekler kazanabilmeleri için hangi seçmeli dersler açılmalı ve ideal seçmeli ders sayısı ne olmalıdır? (ii) Zorunlu ve seçmeli derslerin kazandırdığı bu yeteneklerin ders programında en iyi şekilde dağıtımının sağlanabilmesi için derslerin yetenek dağılımı/örtüşmesi de dikkate alınarak, ders programında hangi zaman periyotlarına atanması gerekmektedir? (iii) Açılacak toplam seçmeli ders sayısının, bölüm yönetimi ve ders programı hazırlama komisyonu tarafından belirlenen çeşitli hedefler üzerindeki etkisi nedir? şeklinde özetlenebilir. Bu araştırma motivasyonu ile bu çalışmada, literatürde son yıllarda tesis içi yerleşim düzeni tasarımı alanında gerçekleştirilen yetenek tabanlı dağıtık yerleşim düzenlemesi yaklaşımlarından [2-4] esinlenilerek, yeni bir yetenek tabanlı üniversite ders zaman çizelgeleme yaklaşımı literatürde ilk defa önerilmiştir. Bu yaklaşımda derslerin öğrenim çıktıları dikkate alınarak, öğrencilere kazandırılması hedeflenen temel yetenekler göz önünde bulundurulmakta, açılacak seçmeli derslere karar verilebilmekte ve tüm zorunlu/seçmeli derslerin, ders programında uygun zaman periyotlarına atanması sağlanarak, belirlenen temel yeteneklerin ders programı üzerinde en iyi şekilde dağıtımının gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Böylece, önerilen yaklaşım ile üretilen yetenek tabanlı ders programları, öğrencilerin öğrenim süreçleri sonunda maksimum sayıda ve çeşitte farklı teknik yetenekleri kazanabilmelerine olanak sağlayabilmektedir. Bu çalışmada önerilen yaklaşımın bilimsel yazına katkısı, mevcut çalışmalara göre avantaj sağlayan yönleri ve araştırma konusunun yeniliği aşağıda özetlenmiştir:

(i) Literatürde tanımlanan klasik hedeflerin yanı sıra, bu çalışma kapsamında önerilen çok amaçlı doğrusal olmayan eniyileme modelinde, ders programı üzerinde en iyi yetenek dağıtımının

sağlanması (Derslerin kazandırdığı yeteneklerin dağılımına/örtüşmelerine göre, ders programındaki zaman periyotlarına en iyi şekilde atanması), öğrencilere dönem içerisinde maksimum sayıda ve çeşitte farklı temel yeteneklerin kazandırılması gibi yeni hedefler, amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. (ii) Önerilen yaklaşımda derslerin öğrenim kazanımları dikkate alınarak, öğrencilere kazandırılması hedeflenen göreceli olarak birbirinden farklı temel yeteneklerin sayısını en büyükmek için açılması gereken seçmeli derslerin neler olduğuna ve ideal seçmeli ders sayısına da gerçekleştirilen senaryo analizleri ile karar verilebilmektedir. (iii) Önerilen yaklaşımda, öğrencilere farklı yetenekler kazandırabilen dersler, aynı zaman periyoduna paralel atanmayarak; öğrencilerin kazanması hedeflenen temel yeteneklerin ders programında en iyi şekilde dağıtımını sağlanabilmektedir. Bu hususta formüle edilen kısıt fonksiyonları ile her bir sınıf için her bir zaman periyoduna paralel olarak atanmış derslerin öğrencilere kazandırdığı birbirinden farklı toplam yetenek sayısının, akademik birim yönetimi ve ders programı hazırlama komisyonlarının önceden belirlenen eşik değeri üzerinde olması garanti altına alınmaktadır. Bu sayede, öğrencilere aynı veya benzer yetenekleri kazandıran dersler, ders programında aynı zaman periyoduna atanarak; farklı yetenekler kazandırabilen dersler ise farklı zaman periyotlarına atanarak, öğrencilerin alabildiği dersler ile kazanabileceği toplam temel yetenek sayısı en büyüklenebilmektedir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında geliştirilen eniyileme modeli ile açılması gereken seçmeli derslere karar vermenin yanı sıra, zorunlu/seçmeli derslerin kazandırdıkları yeteneklerin örtüşmesi de dikkate alınarak, en uygun zaman periyotlarına atanması sağlanabilmektedir.

## 2. Literatür Çalışmaları (Literature Review)

Son yıllarda bilimsel yazında, tüm öğrenciler için standartlaştırılmış klasik öğrenme yöntemleri anlayışının aksine, eğitimde kişiselleştirilmiş öğrenme ve öğrenme aktivitelerinin planlanması üzerine yapılan araştırmalar [5, 6], ders içeriklerinin, derslerin öğrenim çıktılarının ve kazandırılan yeteneklerin, ders programlarının hazırlanmasında da dikkate alınması gereken önemli birer faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, literatürde yer alan mevcut çalışmaların birçoğu, öğretim üyelerinin gün/saat tercihleri doğrultusunda beklenti ve isteklerinin maksimum oranda karşılanması [7-10] ve esnek kısıtların ihlal edilmesi durumunda maruz kalınacak ceza maliyetlerinin en küçükleme [11-14] gibi hedeflere odaklanmaktadır. Bu çalışma kapsamında ele alınan yetenek tabanlı üniversite ders zaman çizelgeleme probleminde ise akademik birim öğretim planında yer alan dersler ile öğrencilere kazandırılması hedeflenen temel yeteneklere odaklanılarak, problemin çözümü için Subulan ve Gürsac [15] tarafından geliştirilen başlangıç seviyesindeki eniyileme modeli, tüm gerçekçi kısıt ve koşulları dikkate alarak genişletilerek çok amaçlı, doğrusal olmayan yeni bir karma tamsayı matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, üniversite ders zaman çizelgeleme problemi üzerine gerçekleştirilen kapsamlı derleme çalışmalarından [18-20] ve ilgili alanda son yıllara ait çalışmaların özetlendiği Tablo 1'de sunulan literatür araştırmasından da görüldüğü üzere, mevcut bilimsel yazında, derslerin benzer öğrenim çıktılarının gruplandırılması sonucu elde edilecek çeşitli temel yeteneklerin tüm öğrencilere kazandırılması hedefine odaklanan, bu yeteneklerin ders programı üzerinde en iyi şekilde dağıtımını sağlayan ve öğrencilere maksimum sayıda yeteneği kazandırmaya yönelik olarak hangi seçmeli derslerin açılması gerektiğine karar verebilen herhangi bir yetenek tabanlı ders programı çizelgeleme yaklaşımına rastlanmamıştır.

**Tablo 1.** Üniversite ders zaman çizelgeleme problemi üzerine son yıllarda yapılan çalışmalara ait kısa bir literatür araştırması  
(A brief literature review on the recently published university course timetabling studies)

Referans	Öğretim üyelerinin istekleri	Sıkı/esnek kısıtlar	Ders-zaman periyot ataması	Öğretim üyesi atama	Sınıf sayısı /atama	Yetenek dağıtımı /öğrenim kazanımları	Çözüm Metodolojisi
Abdullah vd. [7]	√	√	√	√	√		Hibrit meta sezgisel yaklaşım
Badoni vd. [11]		√	√		√		Hibrit genetik & yerel arama algoritması
Song vd. [12]		√	√		√		Tekrarlı yerel arama algoritması
Tavakoli vd. [8]	√	√	√	√	√		Üç aşamalı sezgisel algoritma
Gülcü ve Akkan [9]	√	√	√	√	√		Çok amaçlı tavlama benzetimi algoritması
Thepphakorn vd. [13]		√	√	√	√		Hibrit Guguk kuşu arama algoritması
Mokhtari vd. [10]	√		√	√	√		MIP modeli ve Epsilon kısıt yöntemi
Song vd. [16]		√	√	√	√		Rekabet güdümlü yerel arama
Rappos vd. [14]		√	√		√		MIP modeli ve iki aşamalı yerel arama
Mallari vd. [17]	√	√	√	√			Çok amaçlı MIP modeli
Subulan ve Gürsaç [15]		√	√			√	MINLP modeli ve BHP
Bu çalışma	√	√	√		√	√	MINLP modeli, UP ve BHP

## 2. Problem Tanımı ve Matematiksel Model Formülasyonu (Problem Definition and Mathematical Model Formulation)

Bu bölümde, bir EM Bölümü ders programı hazırlama komisyonu tarafından, her akademik yarıyıl öncesinde ele alınan yeni bir yetenek tabanlı ders zaman çizelgeleme problemi tanıtılmıştır. Her yarıyıl öncesi gerçekleştirilen Bölüm Akademik Kurul toplantısında, ilgili dönemin zorunlu derslerine ait açılması planlanan toplam şube sayısı ve açılacak seçmeli dersler belirlenir. Ancak burada belirtilmelidir ki, bu çalışma kapsamında geliştirilen eniyileme modeli ile derslerin öğrenim kazanımları dikkate alınarak, öğrencilere çok sayıda farklı yeteneğin kazandırılabilmesi için açılması gereken seçmeli derslere de karar verilebilmektedir. Öğretim planında yer alan zorunlu derslerin şube sayısı bir veya daha fazla olabilmekte iken, seçmeli derslerin sadece tek bir şubesi mevcuttur. Ayrıca, Fakülte genelinde verilen Matematik, Fizik, Atatürk İlkeleri & İnkılap Tarihi ve Türk Dili gibi derslerin ders programındaki yeri, Fakülte yönetimi tarafından önceden belirlenerek tüm bölümlere iletilir ve bölüm ders programı hazırlama komisyonu üyelerince, sözü edilen ortak zorunlu derslerin programdaki yeri sabitlenir. Buna ilaveten, bölüm ders programı hazırlama komisyonu üyeleri, bölüm dışından gelen öğretim üyelerinin vermiş oldukları servis dersleri (Örneğin, İmal Usulleri, Teknik İngilizce, Elektroteknik ve Elektrik Makinaları, İş Sağlığı ve Güvenliği vb.) için kendileri ile iletişime geçerek ilgili öğretim üyesinin kendi veya diğer bölümlerde kesinleşen ders programları doğrultusunda, ilgili servis derslerinin ders programındaki yerini önceden birlikte tayin ederler. Bu temel girdiler (Ders programındaki yeri önceden sabitlenen ortak zorunlu ve servis dersleri) doğrultusunda ders programı hazırlama komisyonu, bölüm zorunlu/seçmeli derslerine ait nihai ders zaman çizelgesini hazırlar. Diğer bir ifadeyle, zorunlu derslere ait farklı şubelerin ve seçmeli derslerin ders programındaki hangi zaman periyotlarına atanacağı belirlenir. Bu bağlamda, derslerin öğrenim kazanımlarını da dikkate alarak, tüm öğrencilere dönem içerisinde kazandırılacak temel yetenek sayısını en büyükleyen çok amaçlı bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen eniyileme modeline ait notasyon Tablo 2’de sunulmuştur. Ayrıca, önerilen yetenek tabanlı üniversite ders zaman çizelgeleme problemine ait temel girdiler/parametreler, çıktılar/karar değişkenleri ve hedefler/amaç fonksiyonları Şekil 1’de özetlenmiştir. Matematiksel programlama modelinin geliştirilme sürecinde kabul gören temel varsayımlar

aşağıda listelenmiştir: (i) Bölüm dışından gelen öğretim üyeleri tarafından verilen servis dersleri dışında, hiçbir bölüm zorunlu/seçmeli dersinin haftalık toplam ders saati bölünemez. Diğer bir ifadeyle, her ders programında sadece tek bir zaman periyoduna/oturuma atanabilir. (ii) Fakülte genelinde verilen ve programdaki yeri önceden sabitlenen ortak zorunlu derslerden hangilerinin haftalık toplam ders saatinin bölünebilir olduğu, Fakülte Yönetimi tarafından belirlenir.

(iii) Fakülte genelinde, 2., 3. ve 4. sınıf öğrencilerinin alması gereken teknik/sosyal seçmeli derslere ait ders programları, bölüm ders programı hazırlama komisyonu tarafından hazırlanmaz. Fakülte Yönetimi tarafından yeterli sayıda ders açılarak ilgili dersler, programda genellikle haftanın ilk ders gününe (pazartesi) atanır. (iv) Laboratuvar ihtiyacı olan uygulamalı derslerin, dönem boyunca laboratuvar ortamında işlendiği ve derslik ihtiyacının olmadığı varsayılmıştır. (v) Bölüm dışından gelen öğretim üyelerinin verdikleri servis dersleri için ilgili öğretim üyesinin kendi bölümündeki kesinleşen ders programı dikkate alındığından ötürü, komisyon sadece bölüm öğretim üyeleri için ders – zaman çakışma kontrolü yapar. (vi) Ders programı hazırlanırken, öğretim üyelerinin verdikleri tüm derslerin aynı güne veya birbirini takip eden günlerin ardışık zaman periyotlarına atanmasını tercih ettikleri varsayılmıştır. (vii) 4. sınıf bölüm seçmeli derslerine, sadece 4. sınıf öğrencileri kayıtlanabiliyorken; 3. sınıf bölüm seçmeli dersleri, hem 3. sınıf hem de 4. sınıf öğrencileri tarafından alınabilmektedir. Bu bilgiler ışığında, Tablo 2’de verilen notasyon kullanılarak geliştirilen model, Eş. 1- Eş. 32’de formüle edilmiştir.

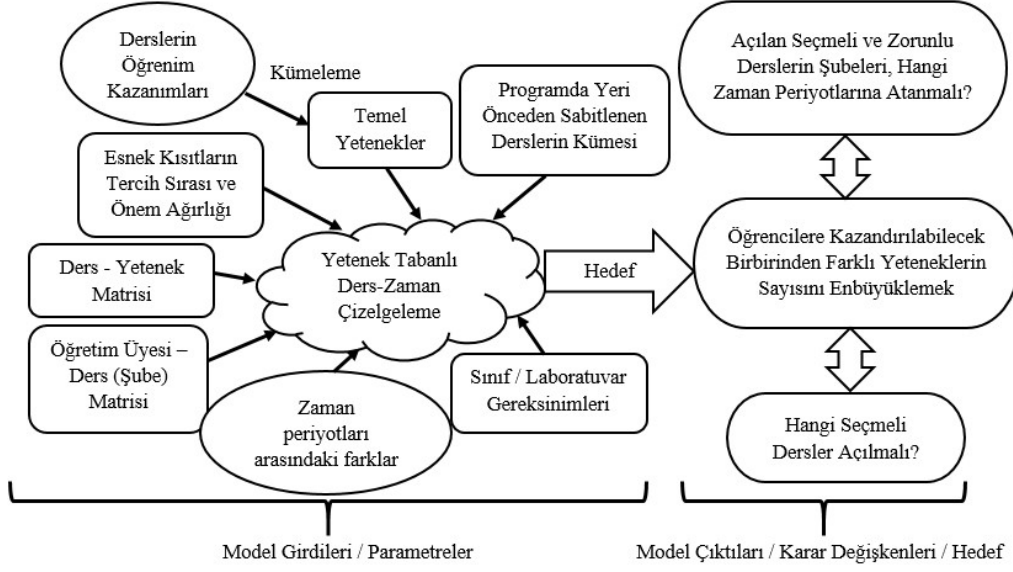
$$ENB \sum_{k \in K} \sum_{m \in K_m} \sum_{i \in L} \sum_{r \in R} y_{kmi} \cdot b_{kr} \quad (1)$$

$$ENB \sum_{k,l \in K | l \neq k} \sum_{m \in K_m} \sum_{r,t \in R | r \neq t} x_{km} \cdot b_{kr} \cdot x_{lm} \cdot b_{lt} \quad (2)$$

$$ENK \sum_{l \neq k \in K} \sum_{m \in K_m} \sum_{n \in N_n} \sum_{|i \neq j \in L} y_{kmi} \cdot a_{kmn} \cdot y_{lmj} \cdot a_{lmn} \cdot d_{ij} \quad (3)$$

$$ENK \sum_{i \in L} \sum_{s \in S | s_2 = s_1 + 1 \& s_1 \leq 3} \sum_{e \in EV} w_e \cdot (p_{eis} + p_{4is_1s_2} + p_{13i}) \quad (4)$$

Eş. 1’de formüle edilen amaç fonksiyonu ile ilgili akademik yarıyıldaki tüm derslerin ders programında zaman periyotlarına en iyi şekilde ataması yapılarak, öğrencilere kazandırılacak toplam yetenek



**Şekil 1.** Önerilen yetenek tabanlı ders zaman çizelgeleme problemine ait temel parametreler, değişkenler ve hedefler (The main parameters, decision variables and goals of the proposed capability-based course timetabling problem)

**Tablo 2.** Matematiksel programlama modeline ait notasyon (Notation of the proposed mathematical programming model)

İndis ve kümeler	
$k, l \in K$	: Ders programında yer alacak tüm derslerin kümesi (Tüm sınıflara ait zorunlu ve seçmeli dersler)
$r, t \in R$	: Öğretim planı kapsamında öğrencilere kazandırılması hedeflenen tüm temel yeteneklerin kümesi
$i, j \in L$	: Ders programında derslerin atanacağı zaman periyotlarının kümesi
$s \in S$	: Öğretim planında yer alan sınıfların kümesi, $s = 1, 2, 3$ ve $4$
$e \in V$	: Esnek kısıtların kümesi
$m \in K_m$	: $k$ dersine ait şubelerin kümesi ( $m = A, B, C, D$ şubeleri)
$n \in N_n$	: Bölüm öğretim üyelerinin kümesi (Servis dersleri için bölüm dışından gelen öğretim üyeleri hariç)
$C_{ks}$	: $s$ sınıfına ait tüm zorunlu derslerin kümesi
$\xi_{ks}$	: $s$ sınıfına ait 3 veya daha fazla şubeli açılan zorunlu derslerin kümesi
$E_{ks}$	: $s$ sınıfına ait tüm seçmeli derslerin kümesi
$N_k$	: Bölüm dışından gelen öğretim üyeleri tarafından verilen servis derslerinin kümesi
$D_k$	: Haftalık toplam ders saati bölünebilen (Birden fazla zaman periyoduna atanabilen) derslerin kümesi
$Lab_k$	: Derslik yerine laboratuvar ortamında işlenmesi gereken derslerin kümesi
$H_{ks}$	: $s$ sınıfına ait programda atanacağı zaman periyotları Fakülte Yönetimi tarafından önceden sabitlenen zorunlu derslerin kümesi (Tek şubesi olan veya haftalık toplam ders saati bölünebilen dersler)
$G_{is}$	: $s$ sınıfına ait Fakülte Yönetimi tarafından önceden sabitlenen yerli dersler (Sadece tek şubesi olan veya haftalık ders saati bölünebilir olup; tüm şubeleri aynı periyoda atanan) için programda ayrılan zaman periyotlarının kümesi
$W_{ks}$	: $s$ sınıfına ait programda yeri önceden Fakülte yönetimi tarafından sabitlenen tüm derslerin kümesi
$Y_{iks}$	: $s$ sınıfına ait programda yeri önceden sabitlenen $k$ zorunlu dersi için ayrılan zaman periyotlarının kümesi
$r_e$	: $e$ esnek kısıtların Bölüm Yönetimi ve Ders Programı Hazırlama Komisyonu tarafından tercih edilen sırası
Model parametreleri/girdiler	
$a_{kmn}$	: $n$ öğretim üyesi $k$ dersinin $m$ şubesini veriyorsa 1; aksi halde 0
$b_{kr}$	: $k$ dersi öğrencilere $r$ temel yeteneğini kazandırıyor 1; aksi halde 0
$d_{ij}$	: Programda derslerin atanacağı $i$ ve $j$ zaman periyotları/dilimleri arasındaki uzaklık (Zaman farkı)
$w_e$	: $e$ esnek kısıtların önem derecesi için hesaplanan normalize edilmiş ağırlık değeri
$MCR$	: Herhangi bir zaman periyodunda hâlihazırda bulunan maksimum derslik sayısı
$MEC_s$	: $s$ sınıfına ait Bölüm Akademik Kurulu tarafından belirlenmiş olan açılması gereken seçmeli ders sayısı
$BigM$	: Keyfi olarak seçilmiş çok büyük pozitif bir sayı
Model karar değişkenleri/çıktılar	
$x_{km} \in \{0,1\}$	: $k$ dersinin $m$ şubesi açılırsa 1; aksi halde 0 değerini alan ikili değişken
$y_{kmi} \in \{0,1\}$	: $k$ dersinin $m$ şubesi ders programında $i$ zaman periyoduna atanırsa 1; aksi halde 0
$z_i, \lambda_i \in \{0,1\}$	: Eğer-öyleyse kısıtlarının tamsayı programlama formülasyonunda kullanılan yardımcı ikili değişkenler
$p_{eis}$ ( $p1_{is}, p2_{is}, p3_{is}, p4_{is1s2}, p5_{is}, p6_{is}, p7_{is}, p8_{is}, p9_{is}, p10_{is}, p11_{is}, p12_{is}, p13_{is}$ )	: Esnek kısıtların ceza değerleri
$w_{kmlpi}, q_{klm}, \phi_{kml}$	: Doğrusal olmayan hedef/kısıtların doğrusal forma dönüştürülmesi için kullanılan yardımcı değişkenler

sayısı en büyüklenmektedir. Eş. 2'de ise ilgili yarıyıldaki mevcut zorunlu derslerin yanı sıra açılacak seçmeli derslere de karar verilerek, göreceli olarak birbirinden farklı yeteneklerin sayısı en

büyüklenmektedir. Eş. 1 ve Eş. 2'de formüle edilen amaç fonksiyonları, öğrencilere kazandırılacak temel yeteneklere odaklanan, birbirleriyle benzerlik gösteren ve çelişmeyen hedefler

olup; derslerin sahip oldukları yeteneklerin dağılımına göre hangi zaman periyotlarına atanması gerektiği (Eş. 1) ve hangi seçmeli derslerin açılması gerektiği (Eş. 2) gibi farklı kararların alınması bakımından birbirinden farklılık göstermektedir. Eş. 3 ile bölüm öğretim üyeleri tarafından verilen zorunlu/seçmeli derslerin atandığı zaman periyotları arasındaki zamansal fark en küçüklenmektedir. Bir başka deyişle, her bir öğretim üyesi için verdiği tüm derslerin atandığı zaman periyotları arasındaki zamansal farkın uzun olmasını (Örneğin, bir dersinin pazartesi sabah oturumuna, diğerinin cuma öğleden sonra oturumuna atanması) tercih etmedikleri dikkate alınmıştır. Eş. 2 ve Eş. 3, ikili değişkenlerin çarpımını içerdiğinden, ikinci mertebeden (Karesel) doğrusal olmayan amaç fonksiyonlarıdır. Eş. 4 ile esnek kısıtların ihlal edilmesi halinde maruz kalınacak ceza maliyetlerinin ağırlıklı toplamı en küçüklenmektedir.

$$x_{km} = 1 \quad \forall k \in C_{ks}, \forall m \in K_m, s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{i \in L} y_{kmi} = 1 \quad \forall k \in C_{ks} \mid k \notin D_k, \forall m \in K_m, \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{i \in L} y_{kmi} \leq 2 \quad \forall k \in D_k, \forall m \in K_m, \forall s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{k \in C_{ks}} y_{kmi} \leq 1 \quad \forall m \in K_m, \forall i \in L \setminus \{G_{is}\}, \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{k \in C_{ks} \cap H_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} \leq 0 \quad i \in G_{is}, \forall s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{i \in L} y_{kmi} = x_{km} \quad \forall k \in E_{ks}, \forall m \in K_m, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K \setminus \{Lab_k\}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} \leq MCR \quad \forall i \in L \quad (11)$$

Eğer  $\sum_{k \in C_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} > 0$ ,  
Öyleyse  $\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p1_{is} \leq 0 \quad \forall i \in L, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (12)$

$$\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p2_{is} \leq 1 \quad \forall i \in L, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (13)$$

$$\sum_{r,t \in R \mid r \neq t} \sum_{k,l \in C_{k(D)s} \cup E_{k(D)s} \mid k \neq l} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} \cdot b_{kr} \cdot y_{lmi} \cdot b_{lt} - p3_{is} \leq \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} b_{kr} / |K| \quad \forall i \in L, \forall s \in S \quad (14)$$

Eğer  $\sum_{k \in C_{ks1}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} > 0$ ,  
Öyleyse  $\sum_{k \in C_{ks2}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p4_{is1s2} \leq 0$   
 $\forall i \in L, s1, s2 \in S \mid s2 = s1 + 1 \ \& \ s1 \leq 3 \quad (15)$

$$\sum_{k \in C_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p5_{is} \leq 2 \quad \forall i \in L, \forall s \in S \quad (16)$$

$$\sum_{k \in C_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p6_{is} \leq 1 \quad i = 1, 2, s = 2, 3, 4 \quad (17)$$

$$\sum_{k \in C_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p7_{is} \leq 1 \quad i = 9, s = 2, 3, 4 \quad (18)$$

$$\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p8_{is} \leq 0 \quad i = 9, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (19)$$

$$\sum_{k \in C_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p9_{is} \leq 0 \quad i = 10, \forall s \in S \quad (20)$$

$$\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p10_{is} \leq 0 \quad i = 10, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (21)$$

Eğer  $\sum_{k \in C_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} > 1$ ,  
Öyleyse  $\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p11_{is} \leq 0 \quad \forall i \in L, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (22)$

Eğer  $\sum_{k \in \xi_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} > 0$ ,  
Öyleyse  $\sum_{k \notin \xi_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p12_{is} \leq 0 \quad \forall i \in L, \forall s \in S \quad (23)$

Eğer  $\sum_{k \in E_{ks} \mid s=3} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} > 0$ ,  
Öyleyse  $\sum_{k \in E_{ks} \mid s=4} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p13_i \leq 0 \quad \forall i \in L \quad (24)$

$$\sum_{k \in K \setminus \{N_k\}} y_{kmi} \cdot a_{kmn} \leq 1 \quad \forall n \in N_n, \forall i \in L \quad (25)$$

$$\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} x_{km} \cdot a_{kmn} \leq 2 \quad \forall n \in N_n \quad (26)$$

$$\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} \leq 1 \quad \forall i \in L, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (27)$$

$$\sum_{k \in E_{ks} \mid s=3} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} + \sum_{k \in E_{ks} \mid s=4} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} \leq 2 \quad \forall i \in L \quad (28)$$

$$\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} x_{km} = MEC_s \quad s = 3 \text{ ve } 4 \quad (29)$$

$$y_{kmi} = 1 \quad \forall k \in W_{ks}, \forall m \in K_m, \forall i \in Y_{iks}, \forall s \in S \quad (30)$$

$$y_{kmi}, x_{km} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall m \in K_m, \forall i \in L \quad (31)$$

$$p1_{is}, p2_{is}, p3_{is}, p5_{is}, p6_{is}, p7_{is}, p8_{is}, p9_{is}, p10_{is}, p11_{is}, p12_{is}, p13_{is}, p4_{is1s2} \geq 0 \quad \forall i \in L, s, s1, s2 \in S \mid s2 = s1 + 1 \ \& \ s1 \leq 3 \quad (32)$$

Eş. 5'te formüle edilen kısıt ile her sınıfa ait zorunlu derslerin belirlenen sayıdaki tüm şubeleri açılmalı ve Eş. 6 uyarınca, ders programında mutlaka bir zaman periyoduna atanmalıdır. Eş. 6 ile öğretim planında yer alan her sınıfa ait zorunlu derslerin tüm şubelerinin, ders programında sadece tek bir zaman periyoduna atanması garanti edilmektedir. Fakülte yönetimi tarafından ders programındaki yeri önceden belirlenen ve haftalık toplam ders saati bölünebilir olan ortak zorunlu derslerin şubeleri ise birden fazla zaman periyoduna atanabileceğinden, Eş. 6'ya dâhil edilmemiştir. Eş. 7 ile haftalık toplam ders saati bölünebilir olan derslerin her bir şubesi, en fazla iki farklı zaman periyoduna atanabilmektedir (En fazla ikiye bölünebilmektedir). Eş. 8'e göre, her sınıf için farklı iki (veya daha fazla) zorunlu dersin aynı şubesi, ders programında aynı zaman periyoduna atanmamaktadır. Bir başka ifadeyle, aynı zaman periyoduna atanmış zorunlu derslerin şubelerinin birbirinden farklı olması gerekmektedir. Eş. 9 ile her sınıf için programda yeri önceden sabitlenen tek şubeli zorunlu dersler (Örneğin, Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi, Türk Dili, Teknik İngilizce vb.) ve haftalık toplam ders saati bölünebilir olan ortak zorunlu derslerin (Matematik-II, Fizik vb.) tüm şubelerinin atandığı zaman periyotlarına, başka bir zorunlu dersin herhangi bir şubesi atanmamaktadır. Çünkü, haftalık toplam ders saati bölünebilir olan ortak zorunlu derslerin farklı şubeleri, genellikle Fakülte yönetimi tarafından aynı zaman periyoduna atanmaktadır. Örneğin, haftalık toplam dört saati ikiye bölünen Matematik-II dersinin, her iki şubesinin (A ve B şubeleri) ilk iki saati çarşamba günü öğleden sonra oturumuna atanırken; son iki saati ise perşembe günü sabah oturumuna karşılık gelen zaman periyoduna birlikte atanabilmektedir. Bu nedenle, Eş. 9 ile haftalık toplam ders saati bölünebilen derslerin atandığı zaman periyotlarına, başka bir zorunlu dersin herhangi bir şubesi veya seçmeli dersin atanmaması garanti edilmiştir. Eş. 10'a göre, açılma kararı verilen bir seçmeli dersin, ders programında mutlaka bir zaman periyoduna atanması gerekmektedir. Açılmayan bir seçmeli ders, ders programında herhangi bir zaman periyoduna atanamaz. Eş. 11'de formüle edilen kısıt ile her bir zaman periyoduna atanabilecek toplam ders sayısının, maksimum derslik sayısını aşmaması sağlanmaktadır. Laboratuvar uygulaması gerektiren dersler (Örneğin, Bilgisayar Programlama, Simülasyon vb.) için ayrıca bir dersliğe ihtiyaç duyulmadığı varsayılarak, Eş. 11'e dâhil edilmemiştir. Eş. 12'de formüle edilen esnek kısıt ile her sınıf için zorunlu derslerin farklı şubelerinin atandığı zaman periyotlarının paraleline, ilgili sınıfa ait seçmeli derslerin minimum seviyede atanması yapılarak, seçmeli dersleri alabilecek öğrenci sayısının en yükümlenmesi hedeflenmiştir. Böylece, bir seçmeli dersin uygun olmayan bir zaman periyoduna atanmasından ötürü, öğrenciler tarafından seçilememesinin önüne geçilebilmektedir. Zorunlu bir dersin paraleline, ceza maliyetine katlanmak kaydıyla seçmeli ders atanması yapılabildiğinden, bu kısıt esnek kısıt olarak formüle

edilmiştir. Benzer şekilde, Eş. 13'teki diğer bir esnek kısıt ile her sınıfa ait herhangi bir seçmeli dersin atandığı zaman periyodunun paraleline, başka bir seçmeli dersin ataması minimum seviyede yapılarak, seçmeli dersleri alabilen öğrenci sayısının artırılması hedeflenmiştir. Aynı zaman periyoduna birden fazla seçmeli dersin ataması mümkün olduğunca az yapılarak, farklı seçmeli dersleri alabilen dolayısıyla da daha fazla farklı yetenek kazanabilen öğrencilerin sayısı arttırılabilmektedir. Eş. 14'te formüle edilen esnek kısıt ile öğrencilere, farklı yetenekler (Örneğin, programlama/kodlama, eniyileme modeli geliştirme/çözme, veri tabanı tasarlama vb.) kazandırabilecek zorunlu/seçmeli dersler, aynı zaman periyoduna paralel atanmayarak, öğrencilerin kazanması gereken temel yeteneklerin ders programında en iyi şekilde dağıtımı hedeflenmiştir. Diğer bir ifadeyle, her bir sınıf için her bir zaman periyoduna paralel olarak atanan derslerin öğrencilere kazandırdığı birbirinden farklı toplam yetenek sayısının, tüm derslere ait ortalama yetenek sayısı olan 3'ü aşmaması gerekmektedir. Aşması durumunda ise ekstra ceza maliyetine katlanılmaktadır. Bu sayede, öğrencilere aynı veya benzer yetenekleri kazandıran dersler, ders programında aynı zaman periyoduna paralel atanarak; farklı yetenekler kazandırabilen dersler ise farklı zaman periyotlarına atanarak, öğrencilerin alabildiği dersler ile kazanabileceği toplam temel yetenek sayısı arttırılabilmektedir. Bu bağlamda, geliştirilen eniyileme modeli, açılması gereken seçmeli derslere karar vermenin yanı sıra, zorunlu ve seçmeli derslerin kazandırmayı hedeflediği yeteneklerin örtüşmesini de dikkate alarak, zorunlu derslerin ders programındaki konumuna göre açılacak seçmeli derslerin en uygun zaman periyotlarına atanmasını sağlamaktadır. Ayrıca, Eş. 14'te ikili değişkenlerin çarpımı ( $y_{kmi}$  ve  $y_{lmi}$ ) yer aldığından, ikinci mertebeden (Karesel) doğrusal olmayan bir kısıttır. Öğrencilerin bir dersten başarısız olması durumunda, öğrenim gördüğü sınıfın bir alt sınıfından ilgili dersi tekrar alması gerekmektedir. Bu nedenle, Eş. 15'te formüle edilen esnek kısıt ile öğrencilerin bir alt sınıftan ders alabilmesine olanak sağlamak için birbirini takip eden (ardışık) sınıflara ait zorunlu derslerin aynı zaman periyoduna atanmasının minimum seviyede olması garanti edilmektedir. Eş. 16'da formüle edilen diğer bir esnek kısıt ile her sınıf için her bir zaman periyoduna en fazla iki farklı zorunlu dersin paralel olarak atanması tercih edilmiştir. Bu sayede, zorunlu derslerin farklı şubelerine kayıtlanan öğrenci sayılarının birbirinden çok farklılık göstermemesi, dengeli bir şekilde dağılması hedeflenmiştir. Eş. 17'de formüle edilen esnek kısıt ile 2., 3. ve 4. sınıf öğrencilerinin sosyal ve teknik seçmeli dersleri alabilmeleri için pazartesi günü oturumlarına, en fazla bir zorunlu dersin atanması tercih edilmiştir. Bu sayede, ders programında pazartesi gününe atanan zorunlu dersin paralelinde yer alacak teknik/sosyal seçmeli derse, diğer şubelerde bulunan öğrenciler rahatlıkla kayıtlanabilecektir. Eş. 18 ve Eş. 19'da formüle edilen esnek kısıtlar ile bölüm öğretim üyelerinin tercihleri doğrultusunda, 2., 3. ve 4. sınıflar için cuma günü sabah oturumuna en fazla bir zorunlu dersin atanması ve olabildiğince az sayıda seçmeli ders atamasının yapılması garanti edilmektedir. Eş. 20 ve Eş. 21'de formüle edilen esnek kısıtlar ise özellikle son sınıf öğrencilerinin uygulamalı bitirme projeleri kapsamında kısmi zamanlı çalışabileme durumundan ötürü, cuma günü öğleden sonra oturumuna olabildiğince az sayıda ders atamasının yapılmasını sağlamaktadır. Eş. 22'de formüle edilen esnek kısıt, 3. ve 4. sınıflar için bir zaman periyoduna atanan farklı şubeli birden fazla zorunlu ders varsa, ilgili periyoda seçmeli ders atamasının yapılmamasını garanti etmektedir. Bu sayede, seçmeli derslere kayıtlı öğrenci sayısı en büyüklenebilmektedir. Öğrenci numaralarının son hanesinin tek veya çift olması durumuna göre öğrenciler, A veya B şubesine kayıtlıdır. Ancak, bazı derslerin laboratuvar ortamında işlenmesi ve dersi alttan alan öğrencilerin sayısının fazla olması (Derslik/laboratuvar kapasitelerinin sınırlı olması) nedeniyle, bazı zorunlu dersler üç, dört ve hatta beş şubeli olarak açılabilir. Bu durumda, öğrencilerin numaralarına göre sadece iki şubeye kayıtlı olması sebebiyle, üç veya

daha fazla şubeli zorunlu derslerle diğer iki şubeli zorunlu derslerin çakışmasından ötürü, ilgili derslerin alınmama riski ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, Eş. 23'te formüle edilen esnek kısıt ile üç ve daha fazla şubeli zorunlu derslerin paraleline sadece kendi şubeleri veya diğer üç ve daha fazla şubeli derslerden biri atanarak (tek ve iki şubeli derslerin ataması yapılmayarak); söz konusu riskin en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Eş. 24'teki esnek kısıt ile 3. ve 4. sınıf seçmeli derslerinin aynı zaman periyoduna atanması olabildiğince engellenerek, 4. sınıf öğrencilerinin 3. sınıf seçmeli derslerine de kayıtlı olabilmesi sağlanmıştır. Eş. 25 ile her bir öğretim üyesinin vermiş olduğu zorunlu/seçmeli dersler, farklı zaman periyotlarına atanarak; bölüm öğretim üyelerinin ders-zaman çakışmasının önüne geçilmektedir. Eş. 26'da formüle edilen kısıt ile Bölüm Akademik Kurulu kararları doğrultusunda, her bir öğretim üyesinin her bir öğretim döneminde en fazla iki farklı seçmeli ders açabilmesi garanti altında alınmıştır. Eş. 27'de formüle edilen kısıt doğrultusunda, 3. ve 4. sınıflar için her zaman periyoduna atanabilecek seçmeli ders sayısının en fazla "1" olması gerekmektedir. Eş. 28'de formüle edilen kısıt ile bir zaman periyoduna atanan toplam seçmeli ders sayısının (3. ve 4. sınıf bölüm seçmeli dersleri) en fazla "2" olması sağlanmıştır. Eş. 29 ile 3. ve 4. sınıflar için Bölüm Akademik Kurulu tarafından belirlenen sayıdaki seçmeli dersin açılması garanti edilmektedir. Eş. 30'da Fakülte genelinde verilen ortak zorunlu dersler ile bölüm dışından gelen öğretim üyelerinin verdiği servis derslerinin, ders programındaki yeri önceden sabitlenen ilgili zaman periyotlarına atanması gerçekleştirilmiştir. Bir diğer ifadeyle, söz konusu derslerin ilgili zaman periyoduna atanması yapılarak, geliştirilen modele girdi oluşturması sağlanmıştır. Eş. 31'de hangi seçmeli derslerin açılacağı ve zorunlu derslerin şubelerinin ders programında hangi zaman periyoduna atanacağına ilişkin kararlar, ikili değişken olarak tanımlanmıştır. Eş. 32'de, Eş. 12 - Eş. 24'teki esnek kısıtların ihlal edilmesi halinde ortaya çıkacak ceza değerleri, pozitif sürekli değişken olarak tanımlanmıştır.

### 3. Çözüm Metodolojisi (Solution Methodology)

#### 3.1. Önerilen Matematiksel Modelin Doğrusallaştırılması (Linearization of the Proposed Mathematical Model)

Bilimsel yazında ilk defa bu çalışma kapsamında önerilmiş olan yetenek tabanlı üniversite ders zaman çizelgeleme probleminin çözümü için geliştirilen yeni bir karma tamsayılı çok amaçlı eniyileme modelinin, ikinci mertebeden doğrusal olmayan amaç (Eş. 2, Eş. 3) ve kısıt (Eş. 14) fonksiyonları içermesi nedeniyle, mevcut eniyileme yazılımları/çözümleri ile makul süreler içerisinde global en iyi çözümü elde edilememektedir. Bir başka deyişle, modelin mevcut haliyle uzun hesaplama süreleri içerisinde ancak yerel en iyi çözümünün elde edilebilmesi sebebiyle, öncelikle Eş. 33, Eş. 37, Eş. 41'de formüle edildiği şekilde yardımcı ikili değişkenler eklenerek ( $q_{kmlp}$ ,  $\phi_{kmlt}$  ve  $w_{kmlpi}$ ) doğrusal forma dönüştürülmesi sağlanmıştır [3, 21]. Ayrıca, Eş. 12, Eş. 15'te formüle edilen eğer-öyleyse kısıtlarına ilişkin tamsayılı programlama formülasyonu, büyük  $M$  ve yardımcı ikili değişkenler ( $z_i$  ve  $\lambda_i$ ) kullanılarak, Eş. 45,-Eş. 48'de yeniden formüle edilmiştir [22]. Benzer işlemler, Eş. 22-Eş. 24'te formüle edilen eğer-öyleyse formundaki diğer kısıtlar için de uygulanmıştır. Bu sayede, LINGO 20.0 eniyileme yazılımına ait karma tamsayılı doğrusal programlama çözümleri kullanılarak, tek amaçlı eniyileme kapsamında global en iyi çözümler elde edilebilmiştir.

$$\text{Max} \sum_{k,l \in K} \sum_{m \in K_m} \sum_{r,t \in R} |r \neq t| q_{kmlp} \cdot b_{kr} \cdot b_{lt} \quad (33)$$

$$q_{kmlp} \leq x_{km} \quad \forall k, l \in K \mid l \neq k, \forall m, p \in K_m \quad (34)$$

$$q_{kmlp} \leq x_{lp} \quad \forall k, l \in K \mid l \neq k, \forall m, p \in K_m \quad (35)$$

$$q_{kmlp} \geq x_{km} + x_{lp} - 1 \quad \forall k, l \in K \mid l \neq k, \forall m, p \in K_m \quad (36)$$

$$\text{Min} \sum_{l \neq k \in K} \sum_{m \in K_m} \sum_{n \in N_n} \sum_{i \neq j \in L} \phi_{kml} \cdot a_{kmn} \cdot a_{lmn} \cdot d_{ij} \quad (37)$$

$$\phi_{kml} \leq y_{kmi} \quad \forall k, l \in K \mid l \neq k, m \in K_m, \forall i, j \in L \mid i \neq j \quad (38)$$

$$\phi_{kml} \leq y_{lmj} \quad \forall k, l \in K \mid l \neq k, m \in K_m, \forall i, j \in L \mid i \neq j \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \phi_{kml} &\leq y_{kmi} + y_{lmj} - 1 \\ \forall k, l \in K \mid l \neq k, m \in K_m, \forall i, j \in L \mid i \neq j \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \sum_{r, t \in R \mid r \neq t} \sum_{k, l \in C_{k(l)s} \cup E_{k(l)s} \mid k \neq l} \sum_{m, p \in K_m} w_{kmlpi} \cdot b_{kr} \cdot b_{lt} \\ - p3_{is} \leq 2 \quad \forall i \in L, \forall s \in S \end{aligned} \quad (41)$$

$$w_{kmlpi} \leq y_{kmi} \quad \forall k, l \in C_{k(l)s} \cup E_{k(l)s} \mid k \neq l, m, p \in K_m, \forall i \in L \quad (42)$$

$$w_{kmlpi} \leq y_{lpi} \quad \forall k, l \in C_{k(l)s} \cup E_{k(l)s} \mid k \neq l, m, p \in K_m, \forall i \in L \quad (43)$$

$$\begin{aligned} w_{kmlpi} &\geq y_{kmi} + y_{lpi} - 1 \\ \forall k, l \in C_{k(l)s} \cup E_{k(l)s} \mid k \neq l, m, p \in K_m, \forall i \in L \end{aligned} \quad (44)$$

$$\sum_{k \in C_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p1_{is} \leq \text{BigM} \cdot (1 - z_i) \quad \forall i \in L, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (45)$$

$$\sum_{k \in E_{ks}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p1_{is} \leq \text{BigM} \cdot z_i \quad \forall i \in L, s = 3 \text{ ve } 4 \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in C_{ks1}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p4_{is1s2} \leq \text{BigM} \cdot (1 - \lambda_i) \\ \forall i \in L, s1, s2 \in S \mid s2 = s1 + 1 \ \& \ s1 \leq 3 \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in C_{ks2}} \sum_{m \in K_m} y_{kmi} - p4_{is1s2} \leq \text{BigM} \cdot \lambda_i \\ \forall i \in L, s1, s2 \in S \mid s2 = s1 + 1 \ \& \ s1 \leq 3 \end{aligned} \quad (48)$$

### 3.2. Uzlaşık Programlama & Bulanık Hedef Programlama

#### Yaklaşımları ile Çok Amaçlı Eniyileme

(Multi-objective Optimization via Compromise Programming & Fuzzy Goal Programming Approaches)

Eş. 1-Eş. 4 'te formüle edilen çelişen hedeflerin eş zamanlı olarak ele alınabilmesi ve uzlaşık ders programları (Pareto en iyi çözümler) üretilebilmesi için bilimsel yazında yaygın olarak kullanılan, uzlaşık programlama (UP) ve bulanık hedef programlama (BHP) tekniklerinden yararlanılmıştır. İlk olarak, ağırlıklı dik doğrusal uzaklıklar toplamının en küçüklendiği uzlaşık programlama (UP) tekniği uygulanmıştır. Bu teknik, karar vericiden hedeflerle ilgili herhangi bir subjektif bilgi (tercih sırası, önem ağırlığı, hedef değer vb.) alınmasına gereksinim duymaz ve bir dizi Pareto etkin çözüm arasından tek bir çözümün seçilmesine olanak tanıdığı için bilimsel yazındaki diğer yaklaşımlara nazaran daha az hesaplama süresi içerisinde çözüm elde edilmesini sağlayabilmektedir [23-25]. Eş. 49'da formüle edilen dik doğrusal mesafe metriğinin kullanıldığı uzlaştırıcı amaç fonksiyonu ile tüm amaç fonksiyonlarının ayrı ayrı eniyilenmesi sonucunda elde edilen ideal amaç fonksiyonu değerlerinden ( $F1^*, F2^*, F3^*$  ve  $F4^*$ ), pozitif/negatif yöndeki mutlak sapmaların ( $F1^+, F1^-, F2^+, F2^-, F3^+, F3^-, F4^+, F4^-$ ) ağırlıklı toplamı ( $WE_1, WE_2, WE_3$  ve  $WE_4$ ) en küçüklendiği [23, 24]. Eş. 49, mutlak değer fonksiyonunu içermesi nedeniyle, doğrusal olmayan bir forma sahiptir. Bu nedenle, Eş. 50-Eş. 53'te yeniden formüle edilerek doğrusallaştırılmıştır [26].

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & WE_1 * |F1 - F1^*| + WE_2 * |F2 - F2^*| + \\ & WE_3 * |F3 - F3^*| + WE_4 * |F4 - F4^*| \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & WE_1 * (F1^- + F1^+) + WE_2 * (F2^- + F2^+) + \\ & WE_3 * (F3^- + F3^+) + WE_4 * (F4^- + F4^+) \end{aligned} \quad (50)$$

$$F1^* - F1 + F1^+ - F1^- = 0, \quad F2^* - F2 + F2^+ - F2^- = 0 \quad (51)$$

$$F3 - F3^* - F3^+ + F3^- = 0 \quad F4 - F4^* - F4^+ + F4^- = 0 \quad (52)$$

$$F1^+, F1^-, F2^+, F2^-, F3^+, F3^-, F4^+, F4^- \geq 0 \quad (53)$$

UP'nin yanı sıra, birbiriyle çelişen hedeflere ait hem önem derecelerini hem de önem sırasını eş zamanlı olarak dikkate alabilen çok amaçlı eniyileme yaklaşımı olduğu için Chen ve Tsai [27] tarafından geliştirilen bir bulanık hedef programlama (BHP) yaklaşımı kullanılarak, çeşitli Pareto en iyi çözümler elde edilebilmiştir. Hedef programlama çeşitli alanlarda [28] yaygın olarak uygulanan en temel çok amaçlı eniyileme tekniklerinden biridir. Uygulanan yaklaşım sonucunda elde edilen bulanık eniyileme modeli, Eş. 54 - Eş. 57'de belirlilik altındaki klasik eşdeğer forma dönüştürülmüştür. Eş. 54'te, hedeflere ait üyelik derecelerinin/tatmin düzeylerinin ( $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  ve  $\mu_4$ ) toplamı en büyüklenmektedir. Her bir hedefe ait üyelik fonksiyonları Eş. 55'te verilen kısıtlarda formüle edilmiştir. Eş. 56'ya göre, her bir bulanık hedefe ait tatmin düzeyinin, Bölüm Yönetimi tarafından hedeflerin önem derecesi ve sırası dikkate alınarak belirlenmiş olan arzu edilen tatmin derecelerinden ( $0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  ve  $\alpha_4 \leq 1$ ) büyük eşit olması gerekmektedir. Arzu edilen tatmin derecelerinin oldukça yüksek belirlenmesi durumunda (Örneğin, tüm hedefler için %100 olması), olurlu bir çözüm elde edilmesi mümkün olmayacağından; değerlerinin azaltılması veya üyelik fonksiyonlarının revize edilmesi gerekir. Eş. 57 ile hedeflere ait üyelik derecelerinin 0 ile 1 arasında değer alması sağlanmıştır. UP tekniğinde tanımlanan önem ağırlıkları ile BHP yaklaşımında kullanılan hedeflerin arzu edilen tatmin derecelerinin değerleri sistematik olarak değiştirilerek, Bölüm Yönetiminin tercihleri doğrultusunda çeşitli uzlaşık ders programları üretilebilmektedir.

$$\text{Max} \quad \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 \quad (54)$$

$$\mu_1 \leq \frac{F1 - F1^L}{F1^* - F1^L}, \quad \mu_2 \leq \frac{F2 - F2^L}{F2^* - F2^L}, \quad \mu_3 \leq \frac{F3^U - F3}{F3^U - F3^*} \text{ ve } \mu_4 \leq \frac{F4^U - F4}{F4^U - F4^*} \quad (55)$$

$$\mu_1 \geq \alpha_1, \quad \mu_2 \geq \alpha_2, \quad \mu_3 \geq \alpha_3 \text{ ve } \mu_4 \geq \alpha_4 \quad (56)$$

$$0 \leq \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4 \leq 1 \quad (57)$$

## 4. Bir Endüstri Mühendisliği Bölümünde Uygulama Çalışması (A Case Study at an Industrial Engineering Department)

Bu bölümde, önerilen yetenek tabanlı üniversite ders zaman çizelgeleme probleminin çözümü için geliştirilen çok amaçlı eniyileme modelinin doğruluğunun ve geçerliğinin test edilmesi amacıyla, bir Endüstri Mühendisliği Bölümü'nün bahar yarıyılı eğitim-öğretim dönemine ait bir gerçek hayat uygulamasına yer verilmiştir. Ayrıca, geliştirilen matematiksel programlama modelinden elde edilen eniyileme sonuçları/uzlaşık çözümler, geçmiş yıllarda bölüm ders programı hazırlama komisyonun deneyimleri doğrultusunda sezgisel olarak hazırlanan mevcut ders programları ile karşılaştırılmıştır.

### 4.1. Verilerin Hazırlanması ve Düzenlenmesi (Data Preparation and Processing)

Ele alınan EM bölümü bahar yarıyılı öğretim planında, toplam 57 ders bulunmaktadır (1. sınıf 7 zorunlu ders, 2. sınıf 6 zorunlu ders, 3. sınıf 4 zorunlu ve açılması muhtemel 23 seçmeli ders, 4. sınıf 3 zorunlu ve açılması muhtemel 14 seçmeli ders).



Bahar yarıyılına ait toplam 20 zorunlu ve 37 seçmeli ders için toplam 300 öğrenim kazanımı mevcuttur. Fizik II, Matematik II (haftalık toplam ders saati bölünebilir dersler), Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi II ve Türk Dili II (haftalık toplam ders saati bölünemeyen dersler) gibi 1. sınıf ortak zorunlu derslerinin programdaki yeri, Fakülte yönetimi tarafından önceden sabitlenmektedir. Ayrıca, Teknik İngilizce, İmal Usulleri vb. gibi bölüm dışından gelen öğretim üyeleri tarafından verilen servis derslerinin ders programındaki yeri, ilgili öğretim üyesinin kendi bölümünde kesinleşen ders programları doğrultusunda önceden tayin edilmektedir. Tüm bu öğrenim kazanımları ve ders içerikleri dikkate alınarak gruplandırılmış ve EM

öğretim planının bahar yarıyılında öğrencilere kazandırılması hedeflenen toplam 29 farklı temel yetenek tanımlanmıştır (Tablo 3).

Bir başka ifadeyle, her bir temel yetenek altında birçok farklı derse ait benzer öğrenim kazanımlarının bir araya getirilmesiyle elde edilmiştir. Tanımlanan toplam 300 öğrenim çıktısının, hangi temel yeteneklerin hangi öğrenim kazanımlarına katkıda bulunduğu, bu çalışma kapsamında kullanılan temel veriler arasındadır. Örneğin, endüstriyel bir probleme özgü matematiksel programlama modeli geliştirip, eniyileme yazılımları kullanarak çözebilme yeteneği, Yöneylem Araştırması-II, Sistem ve Matematiksel Modelleme gibi

**Tablo 3.** Endüstri mühendisliği bahar yarıyılı eğitim-öğretim programı ile kazandırılması hedeflenen temel yetenekler (Basic capabilities/skills to be acquired by the Educational Program of Industrial Engineering in the spring semester)

Yet. No.	Temel Yetenek Tanımı	Yet. No.	Temel Yetenek Tanımı
YT1	Türkçe'nin yapı ve işleyiş özelliklerini kavrayıp anlatım bozukluklarını fark edebilme, yazılı/sözlü olarak dili doğru kullanabilme	YT16	İş ölçümü, iş analizi ve tasarımı yapabilme, hareket ve zaman etüdü çalışmaları yapabilme, Ergonomi temel kavramlarını ve tekniklerini kullanabilme
YT2	Türk devrimlerini ve kuruluşundan günümüze Türkiye'de yaşanan siyasi, ekonomik, toplumsal gelişmeleri yorumlayabilme	YT17	Temel iş sağlığı ve güvenliği kanunları ve kalite standartları, iş yerlerinde kanun ve yönetmelikleri uygulayabilme, iş/işletme hukuku işlemlerini kavrama
YT3	Elektrik ve manyetizmanın temel ilkeleri ile malzemelerin elektrik/manyetik özelliklerini yorumlama ve elektrik devreleri tasarlayabilme	YT18	Finansal tabloları analiz edebilme, farklı maliyetlendirme tekniklerini kullanabilme, sermaye bütçelemesi, maliyet muhasebesi ve analizi yapabilme, işletme ekonomisi ve mühendislik ekonomisi tekniklerini uygulayabilme
YT4	Analitik geometri, limit, süreklilik, türev ve çok katlı integralleri, mühendislik problemleri ile ilişkilendirerek uygulamalarda kullanabilme	YT19	Yeni ürün/iş geliştirme için teknik ve finansal fizibilite çalışmaları yapabilme, pazar ihtiyaçlarını yeni ürün fikirlerine çevirebilme ve süreci tanımlayabilme, endüstriyel piyasaları ve pazarları analiz edebilme
YT5	Endüstri mühendisliği mesleği, temel kavramları, uygulama alanları ve kapsamını, teknik İngilizce terimleri ile ifade edebilme	YT20	İş yeri kuruluş yeri seçebilme, tesis içi yerleşim düzeni tasarlayabilme, tesis planlama ve malzeme taşıma-aktarma sistemlerinin seçimi ve analizini yapabilme
YT6	Çeşitli imalat tekniklerinin (Döküm, plastik şekil verme, kaynak ve Talaşlı imalat) endüstrideki uygulamalarını yorumlayabilme	YT21	Enerji sistemlerini tasarlayabilme & modelleyebilme, çevresel & sürdürülebilirlik konularını dikkate alarak ilgili problemleri modelleyebilme ve çözebilme
YT7	Elektriğin temel kavramlarını kullanarak, DC ve AC sistemler/motorlar, elektrik alan ve manyetik alan kuramlarını yorumlayabilme	YT22	Temel risk değerlendirme ve analizi tekniklerini kullanabilme, farklı türden belirsizliklerin yarattığı çeşitli riskleri yönetebilme, değerlendirebilme
YT8	Üretim (itme/çekme) ve servis sistemleri, üretim planlama/kontrol, malzeme ihtiyaç planlaması (MRP), stok yönetimi, montaj hattı dengeleme ve üretim çizelgeleme problemlerini çözebilme	YT23	Bir kurumsal kaynak planlama yazılımının çeşitli modüllerini kullanabilme, iş süreci modelleri geliştirebilme ve iş zekâsı yazılımlarını kullanabilme
YT9	Tedarik zinciri yönetimi, lojistik operasyonların planlanması, dağıtım sistemi tasarımı, vaka çalışması analizleri uygulayabilme	YT24	Etkin şekilde yönetilebilen organizasyon düzenleri tasarlama, çağdaş yönetim/organizasyon yaklaşımlarını kavrayabilme
YT10	Bilgi sistemi tasarımı & analizi, veri tabanı ve karar destek sistemi tasarlayabilme, MS Access & SQL ile veri modelleme & analizi yapabilme	YT25	Endüstriyel otomasyon sistemlerindeki analog ve dijital kontrol aygıtlarını, sensörleri, açık/kapalı devre kontrol teknolojilerini uygulayabilme
YT11	Endüstriyel bir probleme özgü matematiksel programlama modeli geliştirip, eniyileme yazılımları kullanarak çözebilme	YT26	Rassallık türündeki belirsizlikleri modelleyebilmek için stokastik süreçler, stokastik programlama ve Markov zincirleri gibi teknikleri uygulayabilme
YT12	Endüstriyel problemleri yapay zekâ algoritmaları (Sezgisel/meta-sezgisel, yapay sinir ağları, makine öğrenmesi algoritmaları) ile bilgisayar programlama dillerini kullanarak çözebilme	YT27	Karar teorisi, karar analizi ve çok kriterli karar verme tekniklerini kullanarak, çeşitli ölçütleri dikkate alarak Endüstri Mühendisliği problemlerinin en iyi çözüm alternatiflerini belirleyebilme
YT13	İstatistik tekniklerini ve paket programlarını kullanarak istatistiksel veri analizi yapabilme, veri madenciliği tekniklerini uygulayabilme	YT28	Proje yönetimi kapsamında, proje planlama ve çizelgeleme, proje kontrolü tekniklerini uygulayabilme, kazanılmış değer analizi yapabilme
YT14	Kalite yönetimi ve güvence kapsamında, istatistiksel kalite kontrol ve süreç iyileştirme tekniklerini uygulayabilme	YT29	İnsan kaynağı gerektiren işlerin analizi, işgücü planlama, işe alma, eğitimi, performans değerlendirme ve ücret belirleme çalışmalarını yapabilme
YT15	İmalat sistemleri ve malzeme-taşıma aktarma sistemlerinin performans analizi için ARENA simülasyon yazılımı ile model geliştirebilme		

zorunlu dersler ve bazı seçmeli dersler (Örneğin, Matematiksel Modelleme ve Uygulamaları, Matematiksel Programlamada Seçilmiş Konular vb.) ile kazandırılabilen olup, bu derslerin öğrenim çıktılarından birçoğu (Örneğin, problemler için deterministik modeller oluşturabilme, LINGO eniyileme modelleme dilini kullanarak problemleri çözebilme, mühendislik problemlerinin çözümü için doğrusal olmayan modeller oluşturabilme ve çözebilme vb.) ilgili yeteneğin kazandırılmasına yönelik olarak tanımlanmıştır. Tablo 3'te tanımlanan ilk 7 yetenek, Fakülte genelinde verilen ortak zorunlu dersler ve bölüm dışından gelen öğretim üyelerinin verdiği servis dersleri ile kazandırılabilen iken; diğer tüm yetenekler, EM eğitim-öğretim programı kapsamında yer alan mesleki zorunlu ve seçmeli dersler ile kazandırılmaktadır. İlgili ders içerikleri ve öğrenim kazanımları dikkate alınarak, hangi zorunlu ve seçmeli dersin hangi temel yetenekleri kazandırabilme potansiyelinin olduğu bilgisini içeren, ders – yetenek matrisi ( $b_{kr}$ , 0-1 ikili parametre değerleri) Tablo 4'te sunulmuştur. Ayrıca, zaman çizelgesinde derslerin atanabileceği 10 zaman periyodu (Haftalık 5 çalışma günü, sabah ve öğleden sonra oturumları) arasındaki zamansal fark matrisi ( $d_{ij}$ ), dik-döğrusal mesafe metriği kullanılarak Tablo 5'te sunulmuştur. Zaman periyotları arasındaki mesafeler, oturum (zaman farkı) cinsinden tanımlanmıştır. Örneğin, pazartesi günü sabah ve cuma günü öğleden sonra oturumları arasındaki zaman farkı, toplam 9 oturumdan oluşmaktadır. Ders programındaki her bir zaman periyodu için derslerin atanabileceği toplam 8 derslik mevcuttur. 2021-2022 bahar yarıyılında, Bölüm Akademik Kurulu tarafından 3. ve 4. sınıflar için açılması gereken seçmeli ders sayıları sırasıyla, 7 ve 2 olarak belirlenmişken; 2022-2023 bahar yarıyılında ise ilgili sınıfların her biri için açılması gereken seçmeli ders sayısı birbirine eşit ve 5 olarak

belirlenmiştir. 2021-2022 ve 2022-2023 bahar yarıyılı için zorunlu derslere ait şube sayıları ve öğretim üyelerinin hangi seçmeli ve zorunlu derslerin hangi şubelerini verdiği bilgisi, kullanılan temel veriler arasındadır. Son olarak, Bölüm Yönetimi ve ders programı hazırlama komisyonu üyeleri tarafından esnek kısıtlara ait öncelik sıralaması yapılmış ve ilgili kısıtlara ait önem dereceleri için normalize edilmiş ağırlık değerleri, sıra tersi yöntemi [29] kullanılarak Eş. 58 yardımıyla hesaplanmıştır (Tablo 6).

$$w_e = \frac{1/r_e}{\sum_{e=1}^v (1/r_e)} \quad (58)$$

#### 4.2. Tek ve Çok Amaçlı Eniyileme Sonuçlarının Mevcut Ders Programları ile Karşılaştırılması

(Comparison of the Single and Multi-objective Optimization Results with the Existing Course Timetables)

Bu bilgiler ışığında, geliştirilen eniyileme modelinin, LINGO 20.0 eniyileme yazılımı aracılığıyla her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı çözümlenmesiyle, 2021-2022 ve 2022-2023 bahar yarıyılı için sırasıyla Tablo 7 ve Tablo 8'de sunulan kazanç matrisleri elde edilmiştir. Bu matrislerde, her bir amacın ayrı ayrı eniyilenmesi sonucu elde edilen tek amaçlı eniyileme sonuçları ve detayları (Çözüm süresi, toplam çözücü iterasyon sayısı, toplam değişken ve kısıt sayıları vb.) yer almaktadır. Eniyileme sürecinde kullanılan bilgisayarın konfigürasyonu, Intel i7 Core 2.4 GHz işlemci ve 16 GB RAM olup, Windows 10 işletim sistemine sahiptir. Kazanç matrislerinin köşegeninde yer alan ideal amaç fonksiyonu değerlerinin, BHP yaklaşımında üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasında ve UP tekniğinde ise ideal çözümler olarak kullanılması sonucunda; 2021-

**Tablo 4.** Hangi derslerin hangi temel yetenekleri kazandırdığını gösteren ikili (0-1) ders-yetenek matrisi örneği  
(An example of course-capability matrix indicates which capabilities can be gained by each course)

Örnek Zorunlu ve Seçmeli Dersler								
Temel Yetenekler	Sistem Simülasyonu	Yöneylem Araştırması	Tedarik & Servis Sistemleri	İşletme Ekonomisi	Yenilikçilik Girişimcilğe Giriş	Simülasyon & Endüstride Uyg.	Ergonomik Değ. & İş Güvenliği	Kurumsal Kaynak Planlanması
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	1	0	0	0	0	1
9	0	0	1	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	1	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0	1	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1
15	1	0	0	0	0	1	0	0
16	0	0	0	0	0	0	1	0
17	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	1	0	0	0	1
19	0	0	1	0	1	0	0	0
20	1	1	0	1	0	1	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	1	0
23	0	0	0	0	0	0	0	1
24	0	0	0	1	1	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1	0	0	0	0	1	0	0
27	0	1	0	0	0	0	0	0
28	0	1	0	1	1	0	0	1
29	0	0	1	0	1	0	1	1

**Tablo 5.** Ders programında derslerin atanacağı zaman periyotları arasındaki dik-doğrusal uzaklıklar/zaman farkları (Rectilinear distances/time lags between the time slots on the course timetable in which the courses are assigned)

Zaman Periyotları	Pzt. Sabah	Pzt. Öğleden sonra	Sal. Sabah	Sal. Öğleden sonra	Çar. Sabah	Çar. Öğleden sonra	Per. Sabah	Per. Öğleden sonra	Cum. Sabah	Cum. Öğleden sonra
Pzt. Sabah	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pzt. Öğ. sonra	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Sal. Sabah	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7
Sal. Öğ. sonra	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6
Çar. Sabah	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5
Çar. Öğ. sonra	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4
Per. Sabah	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3
Per. Öğ. sonra	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2
Cum. Sabah	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1
Cum. Öğ. sonra	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

**Tablo 6.** Esnek kısıtların tercih edilen sırası ve göreceli önem ağırlıkları (Order and relative importance weights of soft constraints)

Esnek kısıtın formülü	Tercih edilen sırası ( $r_e$ )	Göreceli önem ağırlığı ( $w_e$ )
Eş. 12	7	0,048774
Eş. 13	8	0,042677
Eş. 14	6	0,056903
Eş. 15	5	0,068283
Eş. 16	1	0,341417
Eş. 17	2	0,170709
Eş. 18, Eş. 19	9	0,037935
Eş. 20, Eş. 21	10	0,034142
Eş. 22	3	0,113806
Eş. 23	4	0,085354
Eş. 24	3	0,056903

**Tablo 7.** 2021-2022 Bahar dönemi için elde edilen kazanç matrisi ve tek amaçlı eniyileme sonuçları (The payoff matrix and single objective optimization results for 2021-2022 spring semester)

Amaç Fonksiyonları	Amaç Fonk.1	Amaç Fonk.2	Amaç Fonk.3	Amaç Fonk.4	Çözüm süresi (sn.)	Toplam çözücü iterasyon sayısı	Maksimum iyileştirme potansiyeli
Amaç Fonk.1	135	15790	196	217,442	121,65	315	%15,38
Amaç Fonk.2	135	15814	182	217,3054	121,5	4015	%34,95
Amaç Fonk.3	118	11942	40	217,3396	7200*	13062935	%75
Amaç Fonk.4	117	11734	172	1,94	7200*	38816701	%59,86
Toplam değişken sayısı	949469						
Tamsayılı değişken sayısı	949085						
Toplam kısıt sayısı	1804558						

**Tablo 8.** 2022-2023 Bahar dönemi için elde edilen kazanç matrisi ve tek amaçlı eniyileme sonuçları (The payoff matrix and single objective optimization results for 2022-2023 spring semester)

	Amaç Fonk.1	Amaç Fonk.2	Amaç Fonk.3	Amaç Fonk.4	Çözüm süresi (sn.)	Toplam çözücü iterasyon sayısı	Maksimum iyileştirme potansiyeli
Amaç Fonk.1	143	17756	212	178,88	108,22	353	%10,85
Amaç Fonk.2	143	17756	228	178,5	129,21	1776	%24,28
Amaç Fonk.3	130	14536	34	178,87	7200*	4954828	%77,03
Amaç Fonk.4	131	14802	182	2,34	7200*	61209009	%66,28
Toplam değişken sayısı	949448						
Tamsayılı değişken sayısı	949074						
Toplam kısıt sayısı	1804443						

2022 ve 2022-2023 bahar yarıyılları için elde edilen uzlaşık çözümler (Pareto en iyi), sırasıyla Tablo 9 ve 10'da sunulmuştur. Bir başka ifadeyle, UP ve BHP yaklaşımları ile Tablo 9 ve 10'da yer alan çok amaçlı eniyileme sonuçları (Uzlaşık ders programları) elde edilmiştir. BHP yaklaşımı uygulanırken, hedeflerin arzu edilen tatmin derecelerinin minimum değerleri, Bölüm Yönetiminin ve ders programı hazırlama komisyonu üyelerinin tercihleri doğrultusunda,  $\alpha_1 = 0,7$ ,  $\alpha_2 = 0,7$ ,  $\alpha_3 = 0,6$  ve  $\alpha_4 = 0,99$  olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, UP yaklaşımı uygulanırken, hedeflere ait arzu edilen tatmin

derecelerinin minimum değerleri normalize edilerek, önem dereceleri/ağırlıkları  $WE_1 = 0,234$ ,  $WE_2 = 0,234$ ,  $WE_3 = 0,2$  ve  $WE_4 = 0,331$  olarak hesaplanmıştır.

2021-2022 ve 2022-2023 bahar yarıyıllarına ait bazı verilerin farklılık göstermesi nedeniyle (Örneğin, Bölüm Akademik Kurulunca belirlenen zorunlu derslere ait şube sayıları, 3. ve 4. sınıflar için açılması planlanan seçmeli ders sayısı, dersleri veren öğretim üyeleri ve Fakülte yönetimi tarafından ders programındaki yeri önceden

sabitlenen ortak zorunlu derslere ait çizelge vb.), geliştirilen matematiksel programlama modeli, ilgili dönemler için ayrı ayrı çözümlerle Tablo 7-10'da sunulan tek ve çok amaçlı eniyileme sonuçları elde edilmiştir. Ders programı hazırlama komisyonu üyelerinin deneyimleri doğrultusunda sezgisel olarak hazırlanan, 2021-2022 ve 2022-2023 bahar yarıyıllarına ilişkin mevcut ders programlarına ait amaç fonksiyonu değerleri ise Tablo 9 ve 10'un ilk sütununda verilmiştir. Tek amaçlı eniyileme sonuçları incelendiğinde, önerilen matematiksel programlama modeli ile her bir amaç fonksiyonu için önemli ölçüde iyileştirme yapılabildiği açıkça görülebilmektedir. Diğer bir deyişle, mevcut ders programlarına ait amaç fonksiyonu değerleri ile matematiksel programlama modelinin her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı çözülmesi durumunda elde edilen ideal amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırıldığında, maksimum iyileştirme potansiyelinin özellikle Eş. 3, Eş. 4'te formüle edilen 3. ve 4. amaç fonksiyonları için oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Bir başka ifadeyle, önerilen eniyileme modeli ile özellikle bu hedefler açısından, makul bir hesaplama süresi limiti içerisinde (2 saat) önemli oranda iyileştirmeler (2021-2022 ve 2022-2023 bahar yarıyılları için sırasıyla, ortalama olarak %67,43 ve %71,65) sağlanabilmektedir. Bunun yanı sıra, Eş. 1, Eş. 2'de formüle edilen ve yetenek tabanlı üniversite ders zaman çizelgelerinin elde edilmesi açısından önem arz eden 1. ve 2. amaç fonksiyonları için de makul oranda iyileştirmelerin, oldukça kısa hesaplama süreleri içerisinde (2021-2022 ve 2022-2023 bahar yarıyılları için sırasıyla, ortalama olarak %25,16 ve %17,56) yapılabileceği görülmektedir. Burada belirtilmelidir ki, önerilen matematiksel programlama modeli ile Eş. 1, Eş. 2'de formüle edilen amaç fonksiyonları için oldukça kısa hesaplama süreleri içerisinde en iyi çözümler elde edilebiliyorken; Eş. 3, Eş. 4'te formüle edilen amaç fonksiyonları için 2 saatlik bir hesaplama süresi limiti içerisinde, makul oranda eniyileme farkına (alt sınır değerinden sapma yüzdesi) sahip (%10'dan düşük) olurlu çözümler elde edilebilmiştir. Ayrıca, 2021-2022 ve 2022-2023 bahar dönemleri için önerilen model ile tek amaçlı eniyileme kapsamında elde edilen maksimum iyileştirme potansiyelleri karşılaştırıldığında, 2021-2022 bahar döneminde biraz daha yüksek bir oranda iyileştirme (sırasıyla ortalama olarak %46,3 ve %44,6) yapılabildiği görülmüştür. Çok amaçlı eniyileme tekniklerinin uygulanması sonucunda elde edilen uzlaşık ders programlarına ait amaç fonksiyonu değerlerinin, Tablo 7 ve 8'deki

kazanç matrislerinin köşegeninde yer alan tek amaçlı eniyileme sonuçlarına, en iyi ihtimalle eşit veya görece olarak daha kötü olacağı açıktır. Bu sebeple, Tablo 7 ve 8'deki tek amaçlı eniyileme sonuçları mevcut ders programları ile karşılaştırılırken, maksimum iyileştirme potansiyelleri tanımlanmıştır.

Diğer bir deyişle, Tablo 9 ve Tablo 10'da sunulan uzlaşık ders programları ile elde edilen nihai iyileştirme oranlarının, maksimum iyileştirme potansiyellerine eşit veya daha düşük olduğu görülmektedir. Örneğin, tek amaçlı eniyileme sonucunda, 2021-2022 bahar dönemi için ortalama olarak %46,3 oranında maksimum iyileştirme potansiyeli söz konusu iken, BHP ve UP tekniklerinin uygulanması sonucu elde edilen Pareto en iyi çözümlere ait ortalama iyileştirme oranları sırasıyla, %35,92 ve %36,95 olarak gerçekleşmektedir. Benzer şekilde, 2022-2023 bahar dönemi için ortalama olarak %44,6 oranında maksimum iyileştirme potansiyeli söz konusu iken, BHP ve UP teknikleri ile elde edilen uzlaşık çözümlere ait ortalama iyileştirme oranları sırasıyla, %33,87 ve %31,12 olarak izlenmiştir. 2021-2022 ve 2022-2023 bahar dönemleri için önerilen model ile çok amaçlı eniyileme teknikleri aracılığıyla elde edilen nihai iyileştirme oranları karşılaştırıldığında, 2021-2022 bahar döneminde daha yüksek bir oranda iyileştirme (ortalama olarak %3,94 daha fazla) sağlanabildiği görülmüştür. Ayrıca, çok amaçlı eniyileme teknikleri ile her bir yarıyıl için elde edilen hiçbir uzlaşık çözümün diğeri tarafından domine edilmediği de Tablo 9 ve 10'da görülmektedir. Bu bağlamda, UP ve BHP ile elde edilen uzlaşık çözümler karşılaştırıldığında, bu tekniklerin her iki akademik yarıyıl için de aynı hesaplama süresi limiti (2 saat) içerisinde, birbirlerine yakın ortalama iyileştirme oranları sunduğu görülmüştür. Ancak burada vurgulanmalıdır ki, BHP yaklaşımı ile elde edilen uzlaşık çözümler, nispeten daha düşük eniyileme farkına (alt/üst sınır değerinden sapma yüzdesine) sahiptir. 2021-2022 ve 2022-2023 güz yarıyılları için de benzer bir çalışma yapılarak, öncelikle güz dönemine ait eğitim-öğretim programı ile kazandırılması hedeflenen temel yetenekler belirlenmiş; daha sonra bu yetenekleri oluşturan öğrenim kazanımları gruplandırılarak Tablo 4'e benzer bir ders-yetenek matrisi oluşturulmuştur. İlgili yarıyıllarda ders veren öğretim üyeleri, zorunlu derslere ait şube sayıları ve açılması planlanan seçmeli ders sayıları da dikkate alınarak, önerilen matematiksel programlama modeli ve çok amaçlı eniyileme tekniklerinin

**Tablo 9.** 2021-2022 Bahar dönemi için elde edilen çok amaçlı eniyileme sonuçlarının mevcut ders programı ile karşılaştırılması  
(Comparison of the existing course timetable with the multi-objective optimization results for 2021-2022 spring semester)

Amaç Fonksiyonları	2021-2022 Bahar dönemi mevcut ders programı	Bulanık hedef programlama ile elde edilen ders programı	Nihai iyileştirme oranı	Uzlaşık programlama yaklaşımı ile elde edilen ders programı	Nihai iyileştirme oranı
Amaç Fonk.1	117	135	%15,38	135	%15,38
Amaç Fonk.2	11718	15814	%34,95	15790	%34,74
Amaç Fonk.3	160	76	%52,5	84	%47,5
Amaç Fonk.4	4,833	2,857	%40,88	2,43	%49,74
Çözüm süresi (sn.)	-	7200*		7200*	
Eniyileme farkı	-	%5,87		%10,85	

**Tablo 10.** 2022-2023 Bahar dönemi için elde edilen çok amaçlı eniyileme sonuçlarının mevcut ders programı ile karşılaştırılması  
(Comparison of the existing course timetable with the multi-objective optimization results for 2022-2023 spring semester)

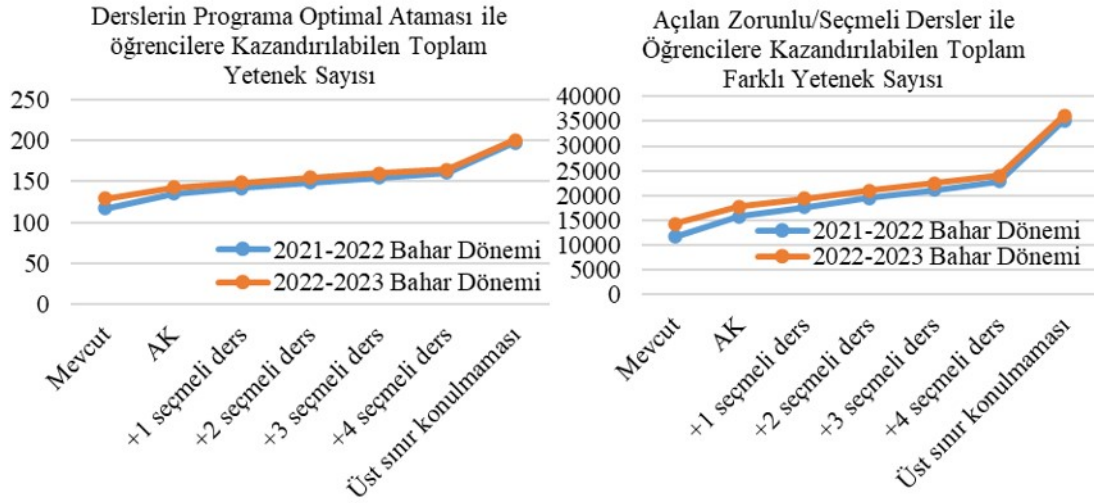
Amaç Fonksiyonları	2022-2023 Bahar dönemi mevcut ders programı	Bulanık hedef programlama ile elde edilen ders programı	Nihai iyileştirme oranı	Uzlaşık programlama yaklaşımı ile elde edilen ders programı	Nihai iyileştirme oranı
Amaç Fonk.1	129	143	%10,85	143	%10,85
Amaç Fonk.2	14287	17744	%24,19	17756	%24,28
Amaç Fonk.3	148	68	%54,05	78	%47,29
Amaç Fonk.4	6,94	3,72	%46,39	4,02	%42,07
Çözüm süresi (sn.)	-	7200*	-	7200*	-
Eniyileme farkı	-	%4,67	-	%12,65	-

uygulanması sonucunda elde edilen uzlaşık ders programları, 2021-2022 ve 2022-2023 güz yarıyıllarına ait mevcut ders programlarıyla karşılaştırılmış ve ortalama olarak, sırasıyla %44,62 ve %42,45 oranında iyileştirme sağlanabildiği görülmüştür. Bu bağlamda, çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel programlama modeli, bölüm ders programı hazırlama komisyonu tarafından tanımlanan çelişen hedefler açısından önemli oranda iyileştirme sağlayabilmesi neticesinde, Bölüm Yönetimi tarafından uygulanabilir bulunmuş ve 2023-2024 bahar dönemi itibarıyla bir karar destek sistemi olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

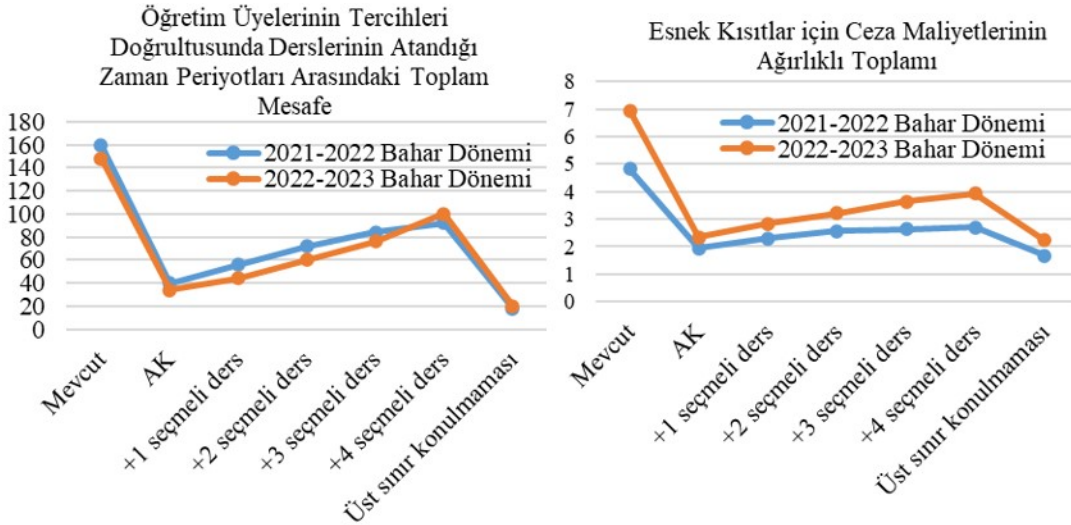
#### 4.3. Açılan Seçmeli Ders Sayısı için Senaryo Analizleri (The Scenario Analysis for the Number of Offered Elective Courses)

Her yarıyıl öncesi gerçekleştirilen Bölüm Akademik Kurulunda (AK), ilgili dönemde açılması gereken minimum seçmeli ders sayısı, ders tekrarı olan öğrenci sayıları da dikkate alınarak belirlenmektedir. Belirlenen sayıdaki seçmeli dersin açılması için ders açmak isteyen öğretim üyelerine öncelik verilmektedir. 2021-2022 ve 2022-2023 bahar yarıyılları için ders programlama komisyonu üyelerinin

deneyimleri doğrultusunda, öğretim üyelerinin tercihleri dikkate alınarak sezgisel olarak hazırlanan mevcut ders programları ile Bölüm Akademik Kurulu tarafından belirlenen sayıdaki seçmeli dersin açılmasını garanti eden eniyileme modelinin ürettiği çözümlere ait amaç fonksiyonu değerleri Şekil 2 ve Şekil 3'te görselleştirilmiştir. Şekil 2 ve 3'te görüldüğü üzere, mevcut ders programlarında yer alan toplam seçmeli ders sayıları ile Akademik Kurulu tarafından belirlenen seçmeli ders sayıları birebir aynı olmasına karşın, geliştirilen model tarafından üretilen çözümler, tüm amaç fonksiyonu değerlerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, her bir sınıf için açılacak toplam seçmeli ders sayısının, çelişen hedefler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, açılacak toplam seçmeli ders sayıları birer birer artırılarak senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen eniyileme modeli, her bir senaryo için ayrı ayrı çalıştırılarak elde edilen en iyi amaç fonksiyonu değerleri Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur. Ancak burada belirtilmelidir ki, geliştirilen modelin Eş. 3, Eş. 4'te yer alan amaç fonksiyonları için çalıştırılması durumunda, sırasıyla 21240 ve 19080 sn. gibi uzun hesaplama süreleri içerisinde en iyi çözümlerin elde edilebiliyor olması sebebiyle ve gerçekleştirilen tüm senaryo analizi sonuçlarının makul süreler



Şekil 2. Açılacak toplam seçmeli ders sayısının Eş. 1, Eş. 2'de formüle edilen amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi  
(The effects of the number of offered elective courses on the objective function values formulated in Equations 1, Equations 2)



Şekil 3. Açılacak toplam seçmeli ders sayısının Eş. 3, Eş. 4'te formüle edilen amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi  
(The effects of the number of offered elective courses on the objective function values formulated in Equations 3, Equations 4)

içerisinde elde edilebilmesi amacıyla, sadece ilgili amaç fonksiyonları için çözüm süresi 2 saat ile sınırlandırılmıştır. Uygulamada ise üniversite ders-zaman çizelgeleme probleminin çözümü yılda iki kez gerçekleştirildiğinden ötürü, nihai ders programları elde edilirken çözüm süresi sınırlandırılmamış ve en iyi çözümler elde edilerek, uygulanmasına karar verilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü üzere, 3. ve 4. sınıflar için açılan toplam seçmeli ders sayısının artırılması durumunda, derslerin ders programına en iyi şekilde atanması sağlanarak öğrencilere kazandırılacak toplam yetenek sayısı da artış göstermektedir.

Seçmeli ders sayısına ilişkin bir üst sınır konulmaması halinde ise tüm seçmeli dersler açılarak, Eş. 1, Eş. 2’de formüle edilen amaç fonksiyonlarına ait üst sınır değerleri elde edilmiştir. Bölüm yönetimi ve ders programı hazırlama komisyonu, senaryo analizlerinden yararlanarak tüm sınıflarda öğrenim gören öğrencilere kazandırılması hedeflenen farklı yeteneklerin sayısına bağlı olarak, açılması gereken seçmeli ders sayısına karar verebilmektedir. Örneğin, derslerin ders programına en iyi şekilde atanması ile öğrencilere kazandırılması hedeflenen toplam yetenek sayısının alt sınır değeri 150 olarak belirlenmiş ise, Bölüm Akademik Kurulu tarafından belirlenen seçmeli ders sayısına ek olarak, 3. ve 4. Sınıflar için birer seçmeli dersin daha açılmasına gerekecektir. Şekil 3’te görüldüğü üzere, her bir sınıf için açılacak seçmeli ders sayısının artırılması durumunda, öğretim üyelerinin beklenti/isteklerinin karşılanması güçleşecektir. Diğer bir ifadeyle, öğretim üyelerinin verdikleri zorunlu/seçmeli derslerin ders programında atandığı periyotlar arasındaki toplam zamansal fark artarak, öğretim üyelerinin tercihlerine uygun çözümler üretilemeyebilecektir. Aynı zamanda, açılan toplam seçmeli ders sayılarındaki artış, esnek kısıtlara ilişkin toplam ceza maliyetlerinde de artışa neden olacaktır. Seçmeli ders sayısına ilişkin bir üst sınır konulmaması halinde ise hiçbir seçmeli dersler açılmayarak, Eş. 3, Eş. 4’te formüle edilen amaç fonksiyonlarına ait alt sınır değerleri elde edilmektedir.

## 5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışma kapsamında ele alınan ana araştırma soruları, (i) Öğrencilerin lisans eğitimi sonunda maksimum sayıda ve çeşitte farklı teknik yetenekler kazanabilmeleri için hangi seçmeli dersler açılmalı ve ideal seçmeli ders sayısı ne olmalıdır? (ii) Zorunlu ve seçmeli derslerin kazandırdığı bu yeteneklerin ders programında en iyi şekilde dağıtımının sağlanabilmesi için derslerin yetenek dağılımı/örtüşmesi de dikkate alınarak, ders programında hangi zaman periyotlarına atanması gerekmektedir? (iii) Açılacak toplam seçmeli ders sayısının, bölüm yönetimi ve ders programı hazırlama komisyonu tarafından belirlenen çeşitli hedefler üzerindeki etkisi nedir? şeklinde özetlenmiştir. Bu sorulara yanıt aramak amacıyla, önerilen yetenek tabanlı üniversite ders zaman çizelgeleme probleminin çözümü için çok amaçlı eniyileme modeli geliştirilmiş ve modelin doğruluğu ve geçerliliğinin test edilmesi için bir Endüstri Mühendisliği Bölümüne ait bahar yarıyılına ilişkin gerçek hayat uygulaması sunulmuştur. Geliştirilen modelden elde edilen tek ve çok amaçlı eniyileme sonuçları, geçmiş yıllarda ders programı hazırlama komisyonunun deneyimleri doğrultusunda sezgisel olarak hazırlanan mevcut ders programları ile karşılaştırılmıştır. Tek amaçlı eniyileme sonuçlarına göre, önerilen model ile derslerin ders programına en iyi şekilde atanması sağlanarak öğrencilere kazandırılacak toplam yetenek sayısında ortalama %13,11, zorunlu ve açılan seçmeli dersler ile öğrencilere kazandırılacak birbirinden farklı toplam yetenek sayısında ortalama %29,61, öğretim üyelerinin tercihleri doğrultusunda derslerin atandığı periyotları arasındaki toplam zaman farkı açısından ortalama %76,01 ve esnek kısıtların ihlal edilmesi durumunda maruz kalınacak toplam ceza maliyeti bakımından ise ortalama %63,07 oranında maksimum iyileştirme potansiyelinin olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan çok amaçlı eniyileme

tekniklerinden elde edilen uzlaşık ders programları, 2021-2022 ve 2022-2023 bahar yarıyıllarına ait mevcut ders programları ile karşılaştırıldığında ise derslerin ders programına en iyi şekilde atanması yapılarak öğrencilere kazandırılacak toplam yetenek sayısında ortalama %13,11, açılan zorunlu/seçmeli dersler ile öğrencilere kazandırılacak birbirinden farklı toplam yetenek sayısında ortalama %29,54, öğretim üyelerinin tercihleri doğrultusunda derslerin atandığı periyotlar arasındaki toplam zamansal fark açısından ortalama %50,33 ve esnek kısıtların ihlal edilmesi durumunda maruz kalınacak toplam ceza maliyeti bakımından ise ortalama %44,77 oranında iyileştirme sağlanabildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, açılacak toplam seçmeli ders sayısının hedefler üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla senaryo analizleri gerçekleştirilmiştir. Senaryo analizlerinden elde edilen uygulama çıkarımları, açılacak toplam seçmeli ders sayısının artırılmasının, öğrencilere kazandırılacak birbirinden farklı toplam yetenek sayısını arttıracak ancak, öğretim üyelerinin isteklerinin karşılanmasını güçleştirebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, geliştirilen çok amaçlı eniyileme modelinin, yetenek temelli hedefler açısından önemli oranda iyileştirme sağlayabilmesi neticesinde, bölüm yönetimi tarafından 2023-2024 bahar dönemi itibarıyla bir karar destek sistemi olarak kullanılmasına karar verilmesi, yönetsel bir çıkarım olarak değerlendirilmektedir. Geliştirilen modelin Eş. 3, Eş. 4’te yer alan amaç fonksiyonları için de makul hesaplama süreleri içinde en iyi çözümleri üretebilmesi amacıyla, meta-sezgisel algoritmalar ile entegre edilerek hibrit bir mat-sezgisel çözüm yaklaşımının geliştirilmesi, gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasındadır. Ayrıca, bu çalışmada ikili (0-1) ders-yetenek matrisi kullanılarak, derslerin tanımlanan yetenekleri kesin bir şekilde kazandırıp/kazandırmadığı bilgisine gereksinim duyulmaktadır. Bunun yerine, derslerin ilgili yetenekleri belli bir derece ile kazandırabildiği bilgisini de dikkate alabilen bulanık eniyileme modeli geliştirilerek, derslerin ilgili yetenekleri kazandırılabilmesine yönelik belirsizliklerin de dikkate alınması, gelecek çalışmalar arasındadır.

## Kaynaklar (References)

1. Lindahl M., Mason A.J., Stidsen T., Sorensen M.: A strategic view of university timetabling. *European Journal of Operational Research*, 266 (1), 35–45, 2018.
2. Baykasoğlu A., Subulan K., Capability-based distributed layout formation with or without demand and process flow information, *Applied Soft Computing*, 94, 106469, 2020.
3. Subulan K., Varol B., Baykasoğlu A., Unequal-area capability-based facility layout design problem with a heuristic decomposition-based iterative mathematical programming approach, *Expert Systems with Applications*, 119199, 2023.
4. Subulan K., Varol B., Baykasoğlu A., Designing robust capability-based distributed machine layouts with random machine availability and fuzzy demand/process flow information, *Soft Computing*, <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08756-y>, 2023.
5. Aslan A., Bakır I., Vis I.F.A., A dynamic thompson sampling hyper-heuristic framework for learning activity planning in personalized learning, *European Journal of Operational Research*, 286 (2), 673–688, 2020.
6. Wouda N.A., Aslan A., Vis I.F.A., An adaptive large neighbourhood search metaheuristic for hourly learning activity planning in personalised learning, *Computers & Operations Research*, 151, 106089, 2023.
7. Abdullah S., Turabieh H., McCollum B., McMullan P., A hybrid metaheuristic approach to the university course timetabling problem, *Journal of Heuristics*, 18, 1–23, 2012.
8. Tavakoli M.M., Shirouyehzad H., Lotfi F.H., Najafi S.H., Proposing a novel heuristic algorithm for university course timetabling problem with the quality of courses rendered approach; a case study, *Alexandria Engineering Journal*, 59, 3355–3367, 2020.
9. Gülcü A., Akkan C., Robust university course timetabling problem subject to single and multiple disruptions, *European Journal of Operational Research*, 283, 630–646, 2020.

10. Mokhtari M., Sarashk M.V., Asadpour M., Saeidi N., Boyer O., Developing a model for the university course timetabling problem: A case study, *Complexity*, 9940866, 2021.
11. Badoni R.P., Gupta D.K., Mishra P., A new hybrid algorithm for university course timetabling problem using events based on groupings of students, *Computers & Industrial Engineering*, 78, 12-25, 2014.
12. Song T., Liu S., Tang X., Peng X., Chen M., An iterated local search algorithm for the university course timetabling problem, *Applied Soft Computing*, 68, 597-608, 2018.
13. Thepphakorn T., Pongcharoen P., Performance improvement strategies on Cuckoo Search algorithms for solving the university course timetabling problem, *Expert Systems with Applications*, 161, 113732, 2020.
14. Rappos E., Thiémond E., Robert S., Hêche J.F., A mixed-integer programming approach for solving university course timetabling problems, *Journal of Scheduling*, 25, 391-404, 2022.
15. Subulan K., Gürsaç A., A multiple objective optimization model for a novel capability-based university course timetabling problem: A case study at DEU industrial engineering department, 12th International Statistics Days Conference, İzmir-Türkiye, 4, 13-16 Ekim, 2022.
16. Song, T., Chen M., Xu Y., Wang D., Song X., Tang X., Competition-guided multi-neighborhood local search algorithm for the university course timetabling problem, *Applied Soft Computing*, 110, 107624, 2021.
17. Mallari, C.B., San Juan, J.L., Li, R., The university coursework timetabling problem: An optimization approach to synchronizing course calendars, *Computers & Industrial Engineering*, 184, 109561, 2023.
18. Babaei H., Karimpour J., Hadidi A., A survey of approaches for university course timetabling problem, *Computers & Industrial Engineering*, 86, 43-59, 2015.
19. Chen M.C., Sze S.N., Goh S.L., Sabar N.R., Kendall G., A survey of university course timetabling problem: Perspectives, trends and opportunities, *IEEE Access*, 9, 106515-106529, 2021.
20. Ceschia S., Gaspero, L.D., Schaerf A., Educational timetabling: Problems, benchmarks, and state-of-the-art results, *European Journal of Operational Research*, 308, 1-18, 2023.
21. Oral M., Kettani O., A linearization procedure for quadratic and cubic mixed-integer problems, *Operations Research*, 40, 109-116, 1992.
22. Winston W.L., *Operations research applications and algorithms*, 4<sup>th</sup> Edition, Wiley, USA, 2004.
23. Baykasoğlu A., Subulan K., A multi-objective sustainable load planning model for intermodal transportation networks with a real-life application, *Transportation Research Part E*, 95, 207-247, 2016.
24. Subulan K., Scheduling multi-objective enterprise resource planning implementation projects under human resource constraints and uncertainty, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1469-1485, 2020.
25. Gan, J., Colletti, J.P., Kolison, S.H., A compromise programming approach to integrated natural resource management, Editör: Sessions, J., Brodie, J.D, *Management Systems for a Global Economy with Global Resource Concerns*. Oregon State University, 378-386, 1995.
26. Baker, K.R., *Optimization Modelling with Spreadsheets*, Wiley & Sons Inc., New Jersey, ABD, 2015.
27. Chen L.H., Tsai, F.C., Fuzzy goal programming with different importance and priorities, *European Journal of Operational Research*, 133 (3), 548-556, 2001.
28. Yazıcı E., Eren T., Alakaş H.M., Personnel scheduling problem in law systems: The example of expropriation cases, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 299-308, 2023.
29. Stillwell W.G., Seaver D.A., Edwards W., A comparison of weight approximation techniques in multi attribute utility decision-making, *Organizational Behavior and Human Performance*, 28, 62-77, 1981.

