



KONUT YAPILARININ MALİYET TAHMİNİNDE KULLANILAN YÖNTEMLERİN PERFORMANS ANALİZİ

¹Mehmet Şükrü ÖZMADEN , ²Mürsel ERDAL 

¹Millî Savunma Bakanlığı, Bütçe ve Mali Hizmetler Genel Müdürlüğü, Fiyat ve Maliyet Analiz Dairesi
Başkanlığı, Ankara, TÜRKİYE

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, TÜRKİYE
¹mehmet.ozmaden@msb.gov.tr, ²merdal@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 02.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.06.2020)

ÖZ: Maliyet tahmini, yatırım kararlarını ve projenin kapsamını etkilemesi açısından işin başında yapılacak fizibilite çalışmalarının belki de en önemli kısmını oluşturmaktadır. Literatürde yapı maliyetlerinin çeşitli tahmin yöntemleri ile belirlenmesi kapsamında yapılmış çalışmalar bulunsa da, bu yöntemlerin geniş çaplı bir performans analizinin yapılmasına yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma kapsamında; konut yapılarının maliyet tahmininde kullanılan gelişmiş tahmin yöntemlerinden altı farklı regresyon modeli, dört farklı makine öğrenmesi modeli ve Bulanık Uzman Sistem Tasarımı olmak üzere toplam on bir adet tahmin modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller üç farklı performans kriteri (Ortalama Hata Karesi, Ortalama Mutlak Yüzde Hatası ve Determinasyon Katsayısı) ile analiz edilerek en iyi tahmini yapan yaklaşım araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Konut yapıları, maliyet tahmini, regresyon analiz modelleri, makine öğrenmesi, bulanık uzman sistem tasarımı, performans analizi.

Performance Analysis of Methods Used in the Cost Estimation of Residential Buildings

ABSTRACT: Cost estimation is perhaps the most important part of the feasibility studies to be carried out at the beginning of the project in order to affect the investment decisions and the scope of the project. Although there are studies in the literature to determine the construction costs with various estimation methods, there is no study for a comprehensive performance analysis of these methods. This scope of work; A total of eleven prediction models, six different regression models, four different machine learning models and Fuzzy Expert System Design, were developed from the advanced estimation methods used in the cost estimation of residential buildings. The created models were analyzed with three different performance criteria (Mean Squared Error, Mean Absolute Percentage Error and Coefficient of Determination) and the best estimating approach was investigated.

Keywords: Residential structures, cost estimate, models of regression analysis, machine learning, fuzzy expert system, performance analysis.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir inşaat projesinde başarı, kaynakların etkin kullanımı ile projenin planlanan zamanda ve bütçe limitini aşmayacak biçimde istenen kalitede gerçekleştirilmesine bağlıdır. İnşaat sektörünün, iç ve dış birçok faktörün etkisinde olan ve özellikleri gereği birçok belirsizlikleri içeren bir sektör olduğu düşünüldüğünde, bu faktör ve belirsizliklerin olası olumsuz etkilerinin minimize edilerek hedeflenen

başarıya ulaşılması için işin başında yapılacak fizibilite çalışmalarının ne kadar önemli olduğu açıktır. Maliyet tahmini, yatırım kararlarını ve proje kapsamını etkilemesi açısından bu fizibilite çalışmalarının belki de en önemli kısmını oluşturmaktadır (Kuruoğlu ve diğ., 2011; Kanıt ve diğ., 2005).

Bu çalışmada yapı maliyet tahmini için farklı bakış açılarına sahip üç yaklaşım kullanılarak en iyi tahmini yapan yaklaşım araştırılmıştır. Bu amaçla belirlenen yaklaşımlar; regresyon modelleri, makine öğrenmesi ve bulanık mantıktır.

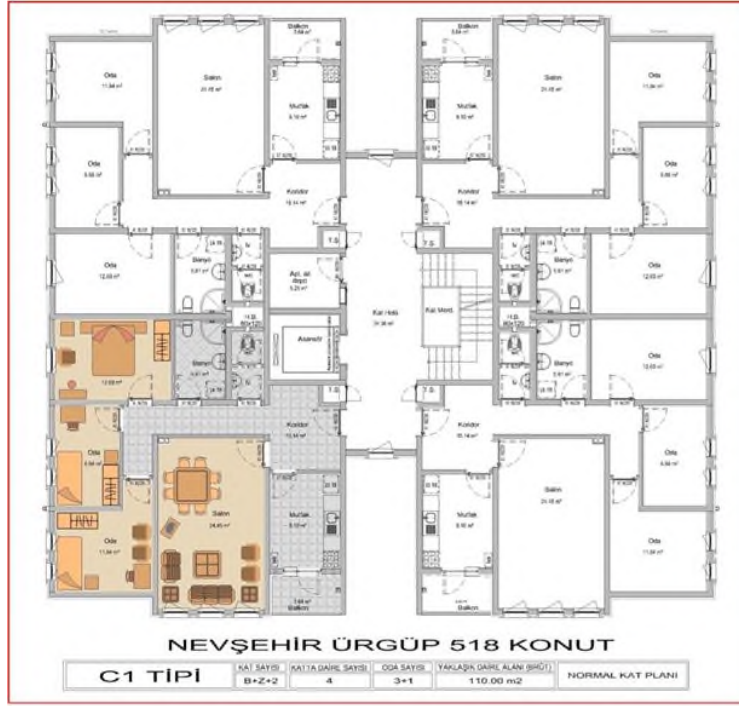
Tahmin modelleri için; TOKİ ve TÜRKONUT'tan sağlanan 63 adet betonarme taşıyıcı sistemli ve bitişik olmayan çok katlı toplu konut projesinden bina tanımlayıcı özelliklerine ait veriler ile 2019 yılına ait gerçekleşen maliyet verileri esas alınmıştır. Analizlerde, girdi olarak sekiz adet bina tanımlayıcı özelliği ve çıktı olarak da maliyet değişkeni kullanılmış ve Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca, bina tanımlayıcı özelliklerine ait tüm veriler Ek 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Analizlerde kullanılan bina tanımlayıcı özellikleri

Table 1. Building descriptive features used in analysis

GİRDİ	X ₁	Cephe yüksekliği (m)
	X ₂	Bir kattaki daire sayısı (ad)
	X ₃	Toplam daire sayısı (ad)
	X ₄	Tip kat alanı (m ²)
	X ₅	Cephe alanı (m ²)
	X ₆	Cephe boşluk alanı (m ²)
	X ₇	Kat sayısı (ad)
	X ₈	Ortalama daire alanı (m ²)
ÇIKTI	M	Maliyet (TL)

TOKİ'ye ait projeler "tip proje" mahiyetinde olup Türkiye'nin çeşitli illerinde 548 ayrı projede uygulanmış ve halen pek çok projede de uygulanmaktadır. TÜRKONUT'a ait projeler ise Ankara, Eryaman'da, 20 adet konut adası üzerinde 185 adet bloktan oluşan ve 46 ayrı tip projenin uygulandığı bölgede yapılmıştır (Uğur ve diğ., 2019). TOKİ tip projelerine ait kat planı örneği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. TOKİ projeleri ait örnek kat planı

Figure 1. Sample floor plan of TOKİ projects

Model oluştururken eğitim ve test kümesinin seçimi ile oluşacak analiz sonuçlarının olumlu veya olumsuz yönde etkilenmesini engellemek, veri bağımlılığını (korelasyon) ve aşırı öğrenmeyi (overfitting) ortadan kaldırmak amacıyla regresyon modelleri ve makine öğrenmesi metotlarında K katlamalı çapraz geçerlilik kullanılmıştır.

K Katlamalı Çapraz Geçerlilik (K-Fold Cross Validity)

Veri kümesi rassal olarak 10 parçaya ayrılmış ve bunlar 10 katlamalı çapraz geçerlilik için kullanılmıştır. Her seferinde bir parça (alt küme) ayrılmış ve kalan dokuz alt küme ile belirtilen yöntemler dikkate alınarak model oluşturulmuştur. Ayrılan bir parça ile de oluşturulan modelin performansı ölçülmüştür. Oluşturulan 10 farklı eğitim ve test kümesi için, önceki kısımlarda bahsedilen regresyon temelli yöntemler ve makine öğrenmesi yöntemleri ile 10 ayrı model oluşturulmuştur. Böylece her veri hem model kurmada hem de model test etmede kullanılmış ve yöntemlerin genel bir model oluşturma kabiliyeti de test edilmiştir (Kaya, 2014).

Seçilen performans kriterlerine göre (OHK: Ortalama hata karesi, OMYH: Ortalama mutlak yüzdesel hata, R²) yöntemlerin 10 seferdeki ortalama başarıları dikkate alınarak elde edilen en iyi modelleri çıkarabilen yöntem seçilmiştir.

REGRESYON MODELLERİ İLE MALİYET TAHMİNİ (COST ESTIMATION WITH REGRESSION MODELS)

Regresyon analizi iki ya da daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan bir analiz metodudur. Eğer tek bir değişken kullanılarak analiz yapılıyorsa tek değişkenli regresyon, birden çok değişken kullanılarak regresyon yapılıyorsa çok değişkenli regresyon olarak isimlendirilmektedir. Regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı ve gücü hakkında bilgi edinilebilmektedir. Normal dağılımlı iki değişken arasında doğrusal ilişki olup olmadığı "Basit Lineer Regresyon Analizi" ile test edilmektedir. Ancak birbirleriyle de etkileşim içinde olan birden fazla değişkenin bir değişkeni etkilediği durumlarda tek değişkenli regresyon analizi yerine çok değişkenli regresyon analizi kullanılmaktadır (Yılmaz ve diğ.,2016).

Çalışma kapsamında dört farklı Lineer Regresyon modeli, Genelleştirilmiş Lineer Regresyon (GLR) ve En Küçük Kareler Yüzde Regresyonu (EKKYR) olmak üzere aşağıda listelenen toplam altı farklı regresyon modeli oluşturulmuştur.

Girne Lineer Regresyon (Bayram, 2013)

Adımsal Lineer Regresyon (İyi, 2006)

İleriye Doğru Seçim Lineer Regresyonu (İyi, 2006)

Geriye Doğru Seçim Lineer Regresyonu (İyi, 2006)

Genelleştirilmiş Lineer Model (GLM) (Koç ve Cengiz, 2012)

En Küçük Kareler Yüzde Regresyonu (EKKYR) (Tümer, 2010)

Regresyon Yöntemlerinin Sonuçları (Results of Regression Models)

Regresyon tabanlı yöntemler K katlamalı çapraz geçerlilik ile test edilmiştir. Bu çalışma kapsamında K=10 alınmıştır. Altı farklı yöntem ile toplam 60 adet model oluşturulmuş ve bunlar OHK (Ortalama Hatanın Karesi), OMHY (Ortalama Mutlak Yüzdese Hata) ve Determinasyon (Belirlilik) Katsayısı (R^2) performans kriterleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar eğitim ve test olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Eğitim kümesi sonuçları modellerin başarılı oluşturulup oluşturulmadığını göstermekte, test sonuçları ise oluşan modellerin genelleme yeteneğini göstermektedir.

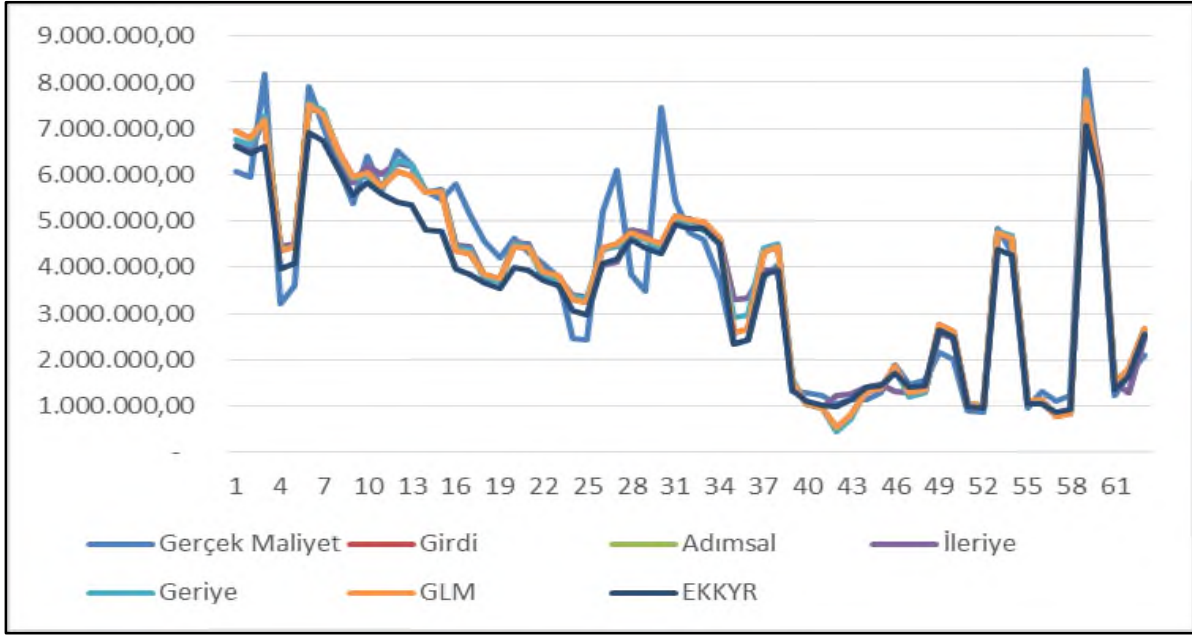
Eğitim verisi için OHK değerleri incelendiğinde, Genelleştirilmiş Lineer Modelin (GLM) diğerlerinden belirgin şekilde yüksek OHK değerine sahip olduğu görülmüş ve bu nedenle iyi bir maliyet tahmini yapamadığı değerlendirilmiştir. Test verileri de bunu teyit etmiştir.

OMHY yüzde olarak hatanın önemli olduğu uygulamalarda ön plana çıkan bir performans kriteridir ve özellikle parasal değerlerin tahmin edildiği uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bundan dolayı bu çalışma kapsamında en önemli performans kriteri olarak düşünülmüştür.

Eğitim verisi için OMYH değerleri incelendiğinde yüksek OMYH değerleri nedeniyle GLM modelinin öğrenemediği ve iyi bir tahmin modeli sunmadığı görülmüştür. Bu durumu teyit için test verilerine bakılmış ve burada da benzer bir durumla karşılaşmıştır. Bundan dolayı tahmin modeli için GLM yönteminin uygun olmadığı söylenebilir. Bu noktada En Küçük Kareler Yüzde Regresyonu (EKKYR) yöntemi öne çıkmaktadır. Eğitim ve test verileri sonuçlarına göre en küçük hata yüzdesini EKKYR modellerinin sunduğu görülmüştür.

İstatistiksel açıklamada kullanılan bir diğer performans kriteri de R^2 değeridir. Bu çalışmada eğitim verisi ile elde edilen R^2 değerlerinden diğer kriterlerde olduğu gibi GLM modellerinin öğrenemediği negatif R^2 değerleri ile görülmektedir.

Test verisi için Determinasyon (Belirlilik) Katsayısı (R^2) değerleri incelendiğinde negatif R^2 değerleri nedeniyle Genelleştirilmiş Lineer Modelin (GLM) öğrenemediği görülmüştür. Bu noktada Geriye doğru seçim, girdi lineer regresyon ve EKKYR yöntemleri ön plana çıkmıştır. Regresyon modellerinin maliyet tahmin performansını gösteren maliyet eğrileri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Regresyon modelleri maliyet karşılaştırma grafiği
Figure 2. Regression models cost comparison chart

Önerilen Regresyon Modeli (Proposed Regression Model)

Bu çalışma kapsamında 10 çapraz geçerlilik kümesi için altı farklı yöntem ile toplam 60 adet model oluşturulmuş ve bu modeller OHK, OMHY ve R^2 performans kriterleri ile değerlendirilmiştir. OMHY kriteri ile en iyi performansı sergileyen EKKYR yöntemi ile verilerin tamamı kullanılarak yeniden bir model oluşturulmuştur. Bu modelin beklenen hata değeri, 10 katlamalı çapraz geçerlilikteki ortalama hatasıdır. Böylece hangi yöntemin seçileceği kararlaştırılmış ve seçilen yöntem ile tüm veriler kullanılarak bir model oluşturulmuştur.

Tüm veriler kullanılarak oluşturulan ve bu çalışma kapsamında önerilen EKKYR tahmin modeli aşağıda formül (1)'de verilmiştir.

$$M = (1961792,718) + (83822,212 \times X_1) - (746182,343 \times X_2) - (14967,210 \times X_3) + (6232,631 \times X_4) + (459,887 \times X_5) + (4716,517 \times X_6) - (217869,098 \times X_7) - (14726,868 \times X_8) \dots \dots \dots (1)$$

MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ İLE MALİYET TAHMİNİ (COST ESTIMATION WITH MACHINE LEARNING METHODS)

Makine öğrenmesinin temel dayanağı, giriş verisini alabilen algoritmalar oluşturmak ve çıktılarını yeni veriler ortaya çıktıkça güncellerken bir çıktıyı tahmin etmek için istatistiksel analiz kullanmaktır (Cankıran, 2020)

Çalışma kapsamında iki farklı Çok Katmanlı Algılayıcı Modeli (ÇKA), Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları (RTFA) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) olmak üzere aşağıda listelenen toplam dört farklı model oluşturulmuştur.

- Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA)
 - 1 Gizli katmanlı ÇKA (Uğur, 2007), (Bayram, 2013)
 - 2 Gizli katmanlı ÇKA (Sarıdemir, 2008)
- Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları (RTFA) (Bayram, 2013)
- Destek Vektör Makineleri (DVM) (Namlı, 2012), (Yolasığmaz, 2015)

ÇKA, geri-yayılım öğrenme sistemini kullanan ve sıklıkla sınıflandırma için uygulanan yapay sinir ağının bir sınıfıdır. Bir giriş katmanı, bir veya daha fazla saklı katman ve bir çıkış katmanından oluşan

ÇKA ağı eğitimi, tanımlanan hata fonksiyonunun minimizasyonu şeklinde ifade edilen bir süreçtir (Keleş, 2018).

RTFA, girdi veri kümesinin özel olarak belirli bir bölgesine düşen değerler için en büyük değerini alan ve bu noktadan uzaklaştıkça daha küçük değerler üreten fonksiyonlar olup denetimli öğrenme kapsamında değerlendirilen ileri beslemeli bir YSA (Yapay Sinir Ağları) modelidir (Keleş, 2018).

DVM, istatistiksel öğrenme teorisi ve yapısal riski en aza indirme ilkesine dayanan, sınıflandırma ve regresyon problemlerinin çözümü amacıyla ortaya atılmış bir öğrenme yöntemidir. Herhangi bir sınıflandırma ya da regresyon problemini, bir karesel programlama problemine dönüştürerek yerel çözümlere takılmadan çözer (Eray, 2008).

Makine öğrenmesi yöntemleri kara kutu (black box) olmaları nedeniyle oluşturdukları modeller, regresyon modellerindeki gibi tam olarak anlamlandırılmamaktadır. Bu sebeple doğruluklarının tespiti için genellikle çapraz geçerlilik yöntemi ile istatistiksel incelemeye tabi tutulmaktadır.

Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Machine Learning Methods)

Makine öğrenmesi yöntemleri ve regresyon tabanlı yöntemler K katlamalı çapraz geçerlilik ile test edilmiştir. Bu çalışma kapsamında $K=10$ alınmıştır. 10 farklı yöntem ile toplam 100 adet model oluşturulmuş ve bunlar OHK, OMHY ve R^2 performans kriterleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, eğitim ve test olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Eğitim kümesi sonuçları modellerin başarılı oluşturulup oluşturulmadığını göstermekte, test sonuçları ise oluşan modellerin genelleme yeteneğini göstermektedir.

Eğitim verisi için OHK değerleri incelendiğinde yüksek OHK değerleri nedeniyle DVM modelinin öğrenemediği ve iyi bir tahmin modeli sunmadığı görülmüştür. Bu durumu teyit için test verilerine bakılmış ve burada da benzer bir durum ortaya çıkmıştır. Böylece tahmin modeli için DVM yönteminin uygun olmadığı söylenebilir.

Test verisi için de benzer şekilde yüksek OHK değerleri nedeniyle DVM modelinin öğrenemediği belirlenmiştir. ÇKA ve RTFA modellerinin karşılaştırılması sonucunda OHK test verisine göre ÇKA 2 Gizli Katmanlı modelin nispeten daha iyi olduğu söylenebilir.

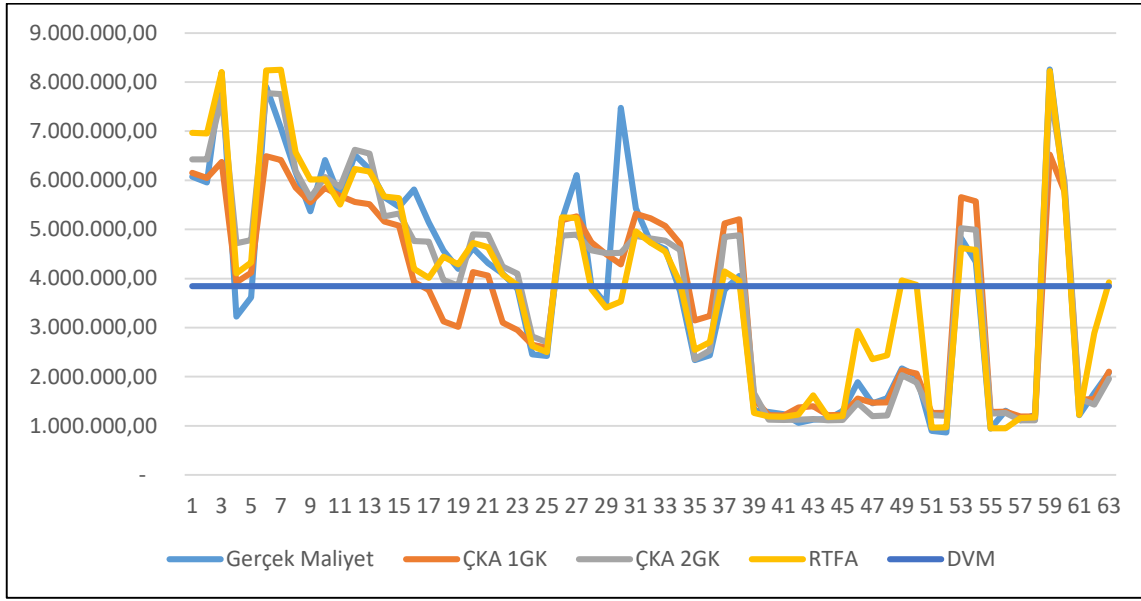
OMHY diğer bir performans kriteridir ve yüzde olarak hatanın önemli olduğu uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Bunlardan biri de parasal değerlerin tahmin edildiği uygulamalardır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında en önemli performans kriteridir.

Eğitim verisi için OMYH değerleri tablosu incelendiğinde yüksek OMYH değerleri nedeniyle GLM ve DVM modellerinin öğrenemediği ve iyi bir tahmin modeli sunmadığı görülmüştür. Bu durumu teyit için test verisine bakılmış ve burada da benzer bir durum görülmüştür. Böylece tahmin modeli için GLM ve DVM yöntemlerinin de uygun olmadığı söylenebilir.

Test verisi için OMYH değerleri tablosu incelendiğinde yüksek OMYH değerleri nedeniyle DVM modelinin öğrenemediği görülmüştür. ÇKA ve RTFA modellerinin OMYH test değerlerinin karşılaştırılması ile ÇKA 1 Gizli Katman modelinin daha iyi tahminlerde bulunduğu değerlendirilmiştir.

İstatistiksel açıklamada kullanılan bir diğer performans kriteri de R^2 değeridir. Temel olarak veriyi (bağımlı değişkeni) tek bir değer, ortalama ile temsil etmeye göre tahmin modelinin ne kadar performans sağladığını gösterir. Bu çalışmada eğitim verisi ile elde edilen R^2 değerleri incelendiğinde, diğer kriterlerde olduğu gibi DVM modelinin öğrenemediği negatif R^2 değerleri ile anlaşılmıştır.

Test verisi için R^2 değerleri incelendiğinde negatif R^2 değerleri nedeniyle DVM modelinin öğrenemediği görülmüştür. R^2 performans değerine göre ÇKA ve RTFA karşılaştırıldığında ise ÇKA 1 Gizli Katmanlı modelin daha iyi tahminlerde bulunduğu belirlenmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerinin maliyet tahmin performansını gösteren maliyet eğrileri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Makine öğrenmesi modelleri maliyet karşılaştırma grafiği
Figure 3. Machine learning models cost comparison chart

BULANIK UZMAN SİSTEM TASARIMI İLE MALİYET TAHMİNİ (COST ESTIMATION WITH FUZZY EXPERT SYSTEM DESIGN)

Bu bölümde bulanık uzman sistem ile maliyet tahmini yapılmaktadır. Bu amaçla öncelikle uzman görüşleri alınarak belirlenen sekiz kriter incelenmiştir. Uzmanların görüşleri doğrultusunda sekiz kriterden dördünün diğer kriterlerin etkisinde olduğu ve maliyet tahmininde etkili olmadığı kanaati ortaya çıkmıştır.

Çıkarılan dört kriter: X1: Cephe yüksekliği, X2: Bir kattaki daire sayısı, X3: Toplam daire sayısı ve X7: Kat sayısı'dır. Bulanık sistem tasarımında dikkate alınacak kriterler ise X4: Tip kat alanı, X5: Cephe alanı, X6: Cephe boşluk alanı ve X8: Ortalama daire alanı'dır. Son üç kriterin (X2, X3, X7) çıkarılmasında bu kriterlerin tam sayı olması nedeniyle bulanıklaştırmaya uygun olmaması da etkili olmuştur.

Temel alınan dört kriter için uzman görüşleri alınarak maliyet tahmini imkanı sağlayan bulanık uzman sistem tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan sistemin model yapısı Baykal ve Beyan'ın (Baykal ve Beyan, 2004) modelinden uyarlanmıştır ve Şekil 4'de verilmiştir.

Kesin girdi: 63 adet bina tanımlayıcı kriteri ve maliyet değerlerinden oluşmaktadır.

Bulanıklaştırma: Her bir kriter ve maliyet için kategoriler belirlenmekte ve üçgen bulanık sayılar yardımıyla bu kategorilerin sınırları uzman görüşleri doğrultusunda tespit edilmiştir. Bulanıklaştırmada kriterler için dört kategori ve maliyet için altı kategori belirlenmiştir.

Bulanık girdi: Kesin girdilerin denk geldiği kategoriler belirlenmiştir.

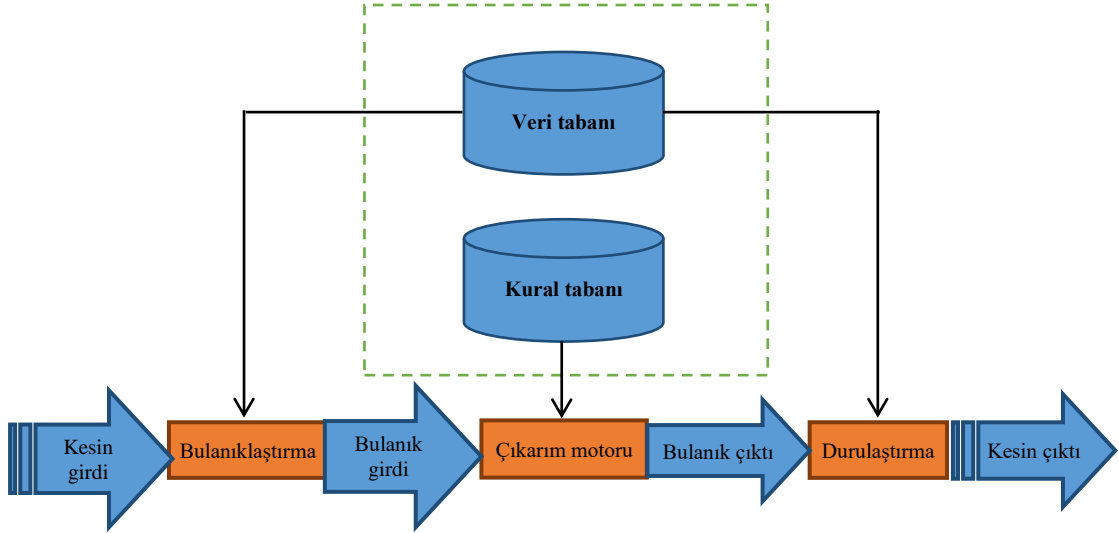
Kural Tabanı: Veri tabanındaki girişleri, çıkış değişkenlerine bağlayan IF (EĞER) – THEN (İSE) türünde yazılabilen bütün kuralları içerir. Bu çalışmada dört kriter için $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ adet bulanık kural yazılabilmektedir (Yılmaz, 2012).

Çıkarım motoru: Her bir kuralın çıkarımlarını bir araya getirerek tüm sistemin girdiler altında nasıl bir çıktı vereceğinin belirlenmesine yarayan birimdir.

Bulanık Çıktı: Bulanık kural tabanının, bulanık çıkarım motorunun etkileşimi sonunda elde edilen çıktı değerlerini vermektedir.

Durulaştırma (Defuzzification): Durulaştırma için duruma göre farklı yaklaşımlardan yararlanılabilir. Genellikle, ağırlık merkezi (centroid), açıortay (bisector), en büyükün ortası (MOM), en büyükün genişliği (LOM) ve en büyükün küçüğü (SOM) yöntemleri kullanılmaktadır. En çok tercih edilen yöntem hiç kuşkusuz ağırlık merkezi (centroid) yöntemidir.

Kesin çıktı: Durulaştırma işleminden sonra girilen dört kriter değeri için tahmin edilen maliyet değerini gösterir. Maliyet değeri bulanıklıktan uzak tamamen kesin bir değerdir.



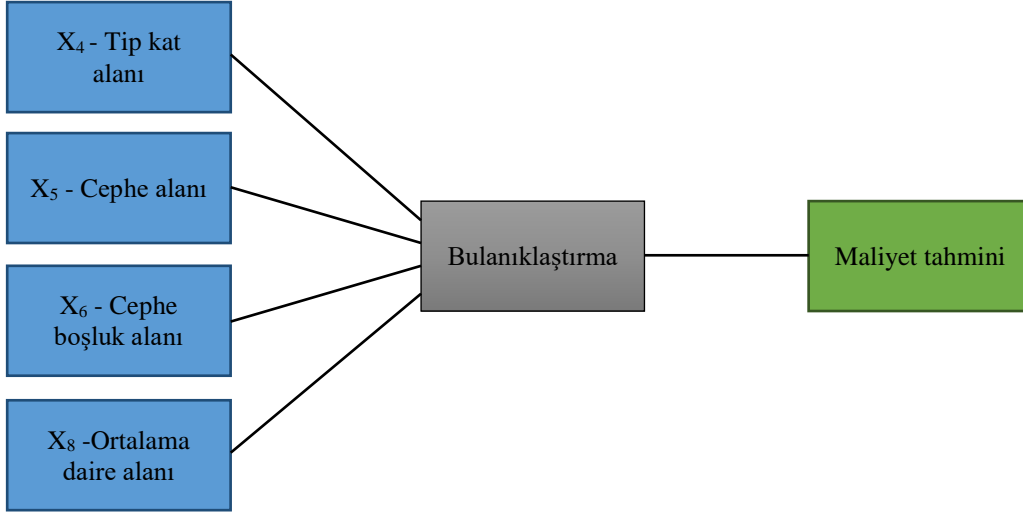
Şekil 4. Bulanık uzman sistem tasarımı

Figure 4. Fuzzy expert system design

Sistem Giriş-Çıkış Değişkenleri (Variables of System Input-Output)

Sistemde ihale maliyeti hesaplanması amacıyla dört girdi ve bir çıktı değişkeninden oluşan girdi-çıkı yapı kullanılmıştır (Şekil 5).

Bu yapıya göre ilk olarak sistemin giriş ve çıkışları için uygun sayısal aralıklar oluşturulur ve her aralık için kategoriler bulunarak eşleştirilir. Kriterlere ait veriler incelendiğinde kriterlerin üçgensel bulanık fonksiyonlarla ifade edilebileceği görülmektedir (Biçer ve diğ.,2019).



Şekil 5. Girdi-çıkı yapıları
Figure 5. Input-output chart

Maliyet Tahmini (Cost Estimation)

Maliyet tahmini için Matlab R2013b programı kullanılmıştır. Programa her bir kriter ve maliyet çıktısı için üyelik fonksiyonları girilmiş, bulanık kurallar tanımlanmış ve daha sonra 63 adet ihale verisi girdi olarak kullanılarak maliyet tahmini yapılmıştır.

Tüm veriler bulanık uzman sisteme girilerek çıkarım mekanizması Mamdani tekniği ve durulaştırma yöntemi ağırlık merkezi seçilerek maliyet tahminleri elde edilmiştir (Öz, 2012). Durulaştırma için ağırlık merkezi yöntemi haricindeki diğer yöntemlerde denenerek gerçek maliyete en yakın sonucu veren yöntem ve tahmini maliyet değerleri belirlenmiştir.

Maliyet Tahmininin Değerlendirmesi (Evaluation of Cost Estimation)

Bulanık uzman sistem ile maliyet tahmin değerlendirme yapabilmek amacıyla ortalama hata karesi (OHK, MSE: Mean Square Error), Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (OMYH, MAPE: Mean Absolute Percentage Error) ve R^2 metrikleri hesaplanmıştır.

Çizelge 2’de durulaştırma yöntemi ağırlık merkezi ve en iyi maliyet tahminini veren durulaştırma yöntemine göre (centroid, bisector, mom, lom, som) OHK, OMYH ve R^2 metrikleri sunulmuştur. Her üç metrik dikkate alındığında durulaştırma yöntemine göre en iyi maliyet tahminini veren yaklaşım daha iyi sonuçlara sahiptir.

Çizelge 2. Bulanık uzman sistem hata metrikleri

Table 2. Fuzzy expert system error metrics

Metrik	Tahmini Maliyet (centroid)	En İyi Maliyet Tahmini (En iyi durulaştırma yöntemi)
OHK	5,70496E+11	2,67663E+11
OMYH	% 15,5908	% 8,4729
R^2	0,875366	0,943529

OHK metriğine göre ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi ile bulunan maliyet tahminlerine ait OHK değeri 5,70496E+11 ve tüm beş durulaştırma yönteminden en iyi maliyet tahminini veren yaklaşımın OHK değeri ise 2,67663E+11’dir. OHK metriğine göre düşük olan değer daha iyi yaklaşımı göstermektedir. OMYH metriğine göre ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi ile bulunan maliyet

tahminlerine ait OMYH % 15,5908 ve tüm beş durulaştırma yönteminden en iyi maliyet tahminini veren yaklaşımın OMYH yüzdesi ise % 8,4729'dur. OMYH metriğine göre düşük olan değer daha iyi yaklaşımı göstermektedir. R² metriğine göre birinci yaklaşım 0,875366 iken, ikinci yaklaşım ise 0,943529'dur. R² metriğine göre ise yüksek olan değer daha iyi yaklaşımı göstermektedir.

Mevcut 63 ihale verisi için bir değerlendirme yapıldığında her ne kadar en iyi maliyet tahminini veren durulaştırma yöntemi ile daha iyi maliyet tahmini yapılırsa da yeni ihaleler için bir tahminde bulunmak gerektiğinde sadece bir durulaştırma yöntemi seçilmek zorundadır. Bu sebeple ağırlık merkezi (centroid) yöntemi ile bulanık uzman sistem tasarımını tercih etmek daha doğru sonuçlar verecektir.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND EVALUATION)

Genel anlamda regresyon modelleri, makine öğrenmesi ve bulanık uzman sistemler ile maliyet tahmin sonuçları hata metrikleri dikkate alınarak mukayese edilmektedir. Altı farklı regresyon modelinden en iyi sonuçları veren EKKYR, makine öğrenmesi yaklaşımlarından en iyi maliyet tahminlerini yapan ÇKA ve bulanık uzman sistem (BUS) yaklaşımı olmak üzere bu üç yöntem karşılaştırılmıştır.

Her üç yaklaşımdan hangisinin daha iyi maliyet tahmini yaptığını bulabilmek amacıyla OHK, OMYH ve R² hata metrikleri karşılaştırılmıştır. EKKYR, ÇKA ve BUS metotlarıyla yapılan maliyet tahmin değerleri Ek 2'de, hata metrikleri özet tablosu ise Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Yöntemlerin hata metriklerine göre karşılaştırılması

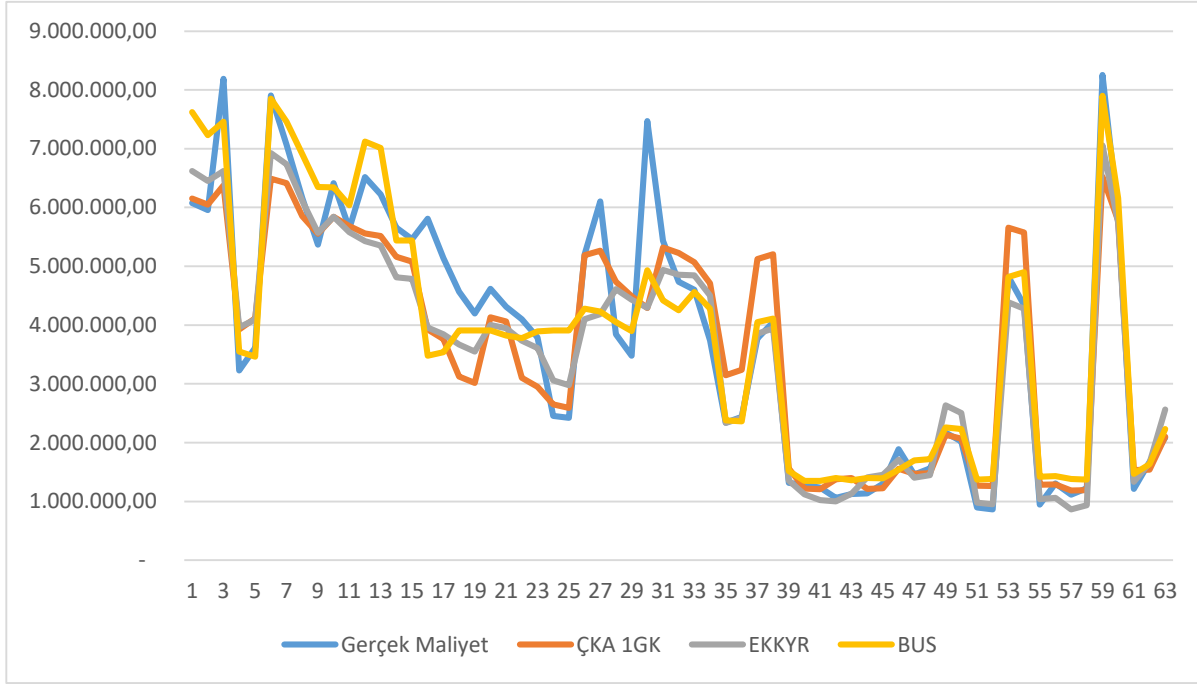
Table 3. Comparison of methods by error metrics

	OHK	OMYH	R ²
EKKYR	5,75096E+11	13,0%	0,892
ÇKA	7,03982E+11	15,7%	0,845
BUS	5,70005E+11	15,6%	0,875

Çizelge 3 incelediğinde; ÇKA metodu her üç hata metriği için en uzak değerlere sahiptir ve diğer iki yönteme göre daha uzak maliyet tahmini yaptığı söylenebilir. Bu durumda geriye kalan EKKYR ve BUS yaklaşımlarının OHK metriğine göre %0,885'lik $[(5,75096E+11-5,70005E+11)/5,75096E+11]$ bir fark ile BUS yönteminin nispeten daha iyi bir tahmin yaptığı söylenebilir. OMYH metriğine göre EKKYR yöntemi %2,6'lık bir farkla daha iyi bir tahminde bulunmuştur. R² metriğine göre ise %0,017'lik bir farkla EKKYR yöntemi daha iyi bir tahmin yapmıştır.

Maliyet gibi bir ölçüt için yani parasal değerlerin tahmin edildiği durumlarda OMYH hata metriğinin dikkate alınması daha uygun görüldüğünden ve üç metrikten ikisinde EKKYR'nin daha iyi tahmin yaptığı ortaya çıktığından ihale maliyet tahmininde EKKYR yönteminin daha başarılı olduğu söylenebilir.

Diğer yandan BUS yaklaşımında sekiz kriter değil de sadece dört kriter girdi olarak alınarak maliyet tahmini yapılmıştır. Başka bir deyişle sekiz kriterin tümünü dikkate almadan daha az girdi ile maliyet tahmini yapılmıştır. Ancak kuşkusuz BUS yönteminin uygulanabilmesi için hazırlık aşaması oldukça zaman alıcıdır. Uzman görüşleri alınarak kriterler azaltılmış, her bir kriter ve maliyet değişkeni için ayrı ayrı üyelik fonksiyonları oluşturulmuş, bulanık kural tabanı tanımlanmış ve maliyet tahmini yapılmıştır. Buna karşın EKKYR modelinde tüm kriterler dikkate alınmakta, modelin uygulanabilmesi için hazırlık aşaması nispeten daha kısa sürmekte ve daha az çaba gerektirmektedir. Gelecekte yeni ihale verileri için bir maliyet tahmini ihtiyacı ortaya çıktığında EKKYR modelinin sadece doğruluk açısından değil uygulama kolaylığı olarak da daha iyi bir seçenek olduğu değerlendirilmiştir. Her üç yaklaşımdan seçilen modellerin maliyet tahmin performansını gösteren maliyet eğrileri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Seçilen modellerin maliyet tahmin performansı grafiği

Figure 6. Cost estimation performance chart of selected models

Sonuç olarak, altı regresyon modeli, dört makine öğrenmesi yöntemi ve bir bulanık mantık yaklaşımı olmak üzere toplam 11 farklı tahmin metodundan en iyi tahmini sağlayan modelin EKKYR olduğu görülmüştür ve bu model formül (1)'de verilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Baykal, N., Beyan, T., 2004, "Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleyiciler", Bıçaklar Kitapevi, Ankara, 191.
- Bayram, S., 2015, "Türkiye Kamu İnşaat Projelerindeki Maliyet Ve Süre Sapmalarının Yapay Zekâ Yöntemleri ile Kıyaslamalı Analizi", Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Biçer, E.B., Arslan, Ö., Biyan, M., 2019, "Bulanık Mantık Yöntemiyle Maliyet Tespiti: Bir Üniversite Hastanesi Örneği", İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, Ekim 2019, Cilt:33, Sayı:4, ss. 1137-1152.
- Cankıran, C., "Makine Öğrenimi Nedir" <https://www.cankıran.com/makine-ogrenimi/>, ziyaret tarihi: 02 Mayıs 2020.
- Eray, O., 2008, "Destek Vektör Makineleri ile Ses Tanıma Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- İyi, P., 2006, "Genetik Algoritma Uygulanarak ve Bilgi Kriterleri Kullanılarak Çoklu Regresyonda Model Seçimi", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Kanıt, R., Baykan, U.N., Erdal, M., (2005), Kısıtlı Kaynak Koşullarının Yapı Maliyetine Etkisinin İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 8 (2), ss.209-221.
- Kaya, E., 2014, "Genetik Algoritma ile Bulanık Kural Kümesinin Otomatik Olarak Oluşturulmasında Yeni Bir Yaklaşım", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Keleş, A.E., Keleş, M.K., 2018, "Genetik Algoritma ile Öznitelik Seçimi Kullanılarak Yapım Yönetiminde Çalışan Liderlik Algısının Tahmini", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(4), ss. 97-110.

- Koç, T., Cengiz, M.A., 2012, "Genelleştirilmiş Lineer Karma Modellerde Tahmin Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırılması", *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2 (2), ss. 47-52.
- Kuruoğlu, M., Çelik, L.Y., Topkaya, E., Yönez, E., 2011, *İnşaat Sektöründe Kullanılan Ön Maliyet Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılması*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. İnşaat Yönetimi Kongresi, 2011.
- Namli, E., 2012, "Proje Yönetimi Kapsamında Risk Tabanlı ve Yapay Zekâ Destekli Bir Maliyet Tahmin Modeli", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öz, B., 2012, "Kamu İnşaat Projelerinde Karşılaşılan İhtilaflar İçin Bir Bulanık Mantık Çözüm Modeli", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sarıdemir, M., 2008, "Farklı Agregalarla Üretilmiş Beton Özelliklerinin Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık ile Tahmin Edilmesi", Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Tümer, G., 2010, "Regresyon Modellerinde En Küçük Kareler Tahmin Edicileri", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Uğur, L.O., 2007, "Yapı Maliyetinin Yapay Sinir Ağı ile Analizi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uğur, L.O., Kanit, R., Erdal, H., Namli, E., Erdal, H.İ., Baykan, U.N., Erdal, M., (2019), "Enhanced Predictive Models for Construction Costs: A Case Study of Turkish Mass Housing Sector" *Computational Economics*, 53 (4), ss.3336-3344.
- Yılmaz, İ., 2012, "Osmanlı Dönemi Mimarlık Eserleri Restorasyon İnşaat Maliyetlerinin Yapay Zekâ Yöntemleri ile Tahmini", Doktora Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, M., Kanit, R., Erdal, M., Yıldız, S., Bakış, A., 2016, "Bina Bakım Onarım Ödeneklerinin Etkin Kullanımı Maksadıyla İhale Bedelini Etkileyen Faktörlerin Yapay Sinir Ağları ve Lineer Regresyon Yöntemleri ile Belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 19 (4), ss. 461-470.
- Yolasığmaz, İ.B., 2015, "Destek Vektör Regresyon Metodu Kullanarak İnşaat Projelerinin Kavramsal Maliyet Tahmini", Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Ek 1. Bina tanımlayıcı özelliklerine ait veriler ile 2019 yılına ait gerçekleşen maliyet verileri

Sıra No	Cephe yüksekliği (m)	Bir kattaki daire sayısı (ad)	Toplam daire sayısı (ad)	Tip kat alanı (m ²)	Cephe alanı (m ²)	Cephe boşluk alanı (m ²)	Kat sayısı (ad)	Ortalama daire alanı (m ²)	MALİYET (TL)
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₀
1	33,30	4,00	44,00	574,50	3373,00	1037,00	11,00	143,60	6076703,60
2	33,20	4,00	44,00	568,20	3216,00	1022,00	11,00	142,10	5955702,40
3	36,20	4,00	50,00	569,90	3137,00	1122,00	13,00	142,50	8190619,30
4	42,00	2,00	30,00	258,40	3087,00	543,00	15,00	129,20	3227715,20
5	42,30	2,00	30,00	267,30	3255,00	552,00	15,00	133,70	3615337,00
6	36,40	4,00	50,00	576,40	3283,00	1166,00	13,00	144,10	7903523,40
7	36,20	4,00	50,00	568,30	3166,00	1145,00	13,00	142,10	7067725,50
8	30,70	4,00	42,00	571,90	3123,00	995,00	11,00	143,00	6163289,30
9	30,60	4,00	42,00	560,00	2984,00	902,00	11,00	140,00	5368422,60
10	36,40	4,00	50,00	513,00	2836,00	921,00	11,00	128,30	6411927,50
11	36,20	4,00	50,00	492,00	2715,00	893,00	11,00	123,00	5641533,80
12	25,20	4,00	36,00	566,80	3112,00	1024,00	13,00	141,70	6515199,90
13	25,10	4,00	36,00	562,00	3088,00	1015,00	13,00	140,50	6223471,10
14	36,40	2,00	26,00	560,30	2876,00	811,00	13,00	280,10	5654464,50
15	36,20	2,00	26,00	558,70	2712,00	824,00	13,00	279,40	5458665,70
16	42,00	2,00	30,00	265,70	3028,00	550,00	15,00	132,90	5811499,60
17	42,00	2,00	30,00	263,80	2843,00	543,00	15,00	131,90	5141377,90
18	33,60	2,00	24,00	260,00	2928,00	488,00	12,00	130,00	4566967,90
19	33,50	2,00	24,00	258,00	2834,00	473,00	12,00	129,00	4198858,50
20	42,00	2,00	30,00	302,50	3096,00	561,00	15,00	151,20	4616767,40
21	42,00	2,00	30,00	298,00	3053,00	553,00	15,00	149,00	4313517,00
22	30,80	2,00	22,00	294,40	2889,00	512,00	11,00	147,20	4097571,20
23	30,60	2,00	22,00	287,70	2734,00	502,00	11,00	143,90	3789333,70
24	36,40	2,00	26,00	210,60	2541,00	388,00	13,00	105,30	2453148,10
25	36,20	2,00	26,00	209,50	2487,00	379,00	13,00	104,80	2424468,50
26	36,40	4,00	48,00	574,20	3287,00	514,00	12,00	143,50	5196396,20
27	36,60	4,00	48,00	579,00	3354,00	521,00	12,00	144,80	6103216,10
28	32,20	3,00	35,00	383,30	3399,00	691,00	12,00	127,80	3842857,70
29	32,20	3,00	35,00	377,00	3122,00	681,00	12,00	125,70	3479420,50
30	29,50	3,00	32,00	423,00	3227,00	621,00	11,00	141,00	7472025,30
31	36,40	3,00	39,00	396,50	3724,00	709,00	13,00	132,20	5430672,30
32	36,40	3,00	39,00	384,00	3645,00	702,00	13,00	128,00	4734630,90
33	33,60	3,00	36,00	412,40	3689,00	682,00	12,00	137,50	4600307,90

34	33,50	3,00	36,00	387,00	3417,00	645,00	12,00	129,00	3740205,20
35	25,85	4,00	36,00	463,10	2244,00	452,00	12,00	115,80	2337905,80
36	25,85	4,00	36,00	472,00	2341,00	456,00	12,00	118,00	2437884,80
37	32,98	4,00	48,00	600,60	3239,00	514,00	12,00	150,20	3771216,80
38	33,02	4,00	48,00	612,00	3314,00	518,00	12,00	153,00	4052095,90
39	16,62	2,00	18,00	348,00	1342,00	179,00	6,00	174,00	1318001,00
40	11,52	2,00	8,00	219,30	691,00	129,00	4,00	109,70	1279502,30
41	11,32	2,00	8,00	215,00	672,00	112,00	4,00	107,50	1235615,80
42	11,16	4,00	16,00	394,50	887,00	166,00	4,00	98,60	1058498,90
43	11,23	4,00	16,00	432,00	892,00	172,00	4,00	108,00	1126750,40
44	11,16	2,00	8,00	181,00	542,00	202,00	4,00	90,50	1139090,90
45	11,32	2,00	8,00	192,00	553,00	209,00	4,00	96,00	1299053,70
46	11,32	4,00	16,00	594,00	1123,00	183,00	4,00	148,50	1886085,00
47	11,16	4,00	16,00	503,00	1040,00	178,00	4,00	125,80	1456922,20
48	11,16	4,00	16,00	512,00	1052,00	181,00	4,00	128,00	1563501,20
49	16,74	4,00	24,00	548,00	1582,00	381,00	6,00	137,00	2170209,00
50	16,74	4,00	24,00	542,00	1521,00	362,00	6,00	135,50	2016514,20
51	11,16	2,00	8,00	316,50	754,00	122,00	4,00	158,30	895282,20
52	11,16	2,00	8,00	312,00	742,00	117,00	4,00	156,00	867025,50
53	36,57	4,00	52,00	546,10	3423,00	634,00	13,00	136,50	4824343,90
54	36,57	4,00	52,00	541,00	3341,00	621,00	13,00	135,30	4341248,20
55	11,16	2,00	8,00	328,40	817,00	132,00	4,00	164,20	945196,70
56	11,16	2,00	8,00	332,00	821,00	137,00	4,00	166,00	1308105,30
57	11,16	2,00	8,00	196,70	596,00	85,00	4,00	98,40	1113974,60
58	11,60	2,00	8,00	199,30	608,00	91,00	4,00	99,70	1223587,00
59	36,40	4,00	50,00	572,30	3296,00	1194,30	13,00	143,10	8255510,50
60	36,40	4,00	50,00	496,70	2788,00	912,60	11,00	124,20	5855706,40
61	16,74	2,00	18,00	337,80	1296,00	174,51	6,00	168,90	1214366,60
62	11,16	4,00	16,00	590,70	1098,00	178,37	4,00	147,70	1668236,80
63	16,74	4,00	24,00	546,10	1567,00	368,47	6,00	136,50	2085565,60

Ek 2. Maliyet tahmin değerleri

S.NU.	GERÇEK MALİYET	EKKYR ile tahmin	ÇKA 1GK ile tahmin	BUS ile tahmin (Centroid)
1	6076703,60	6621321,30	6151924,57	7620000,00
2	5955702,40	6452813,76	6050154,29	7230000,00
3	8190619,30	6618764,22	6375030,90	7460000,00
4	3227715,20	3961449,09	3925617,68	3550000,00
5	3615337,00	4095504,97	4116469,61	3460000,00
6	7903523,40	6927148,04	6488452,21	7850000,00
7	7067725,50	6736499,37	6414005,71	7460000,00
8	6163289,30	6112883,75	5851937,38	6910000,00
9	5368422,60	5571953,46	5555137,65	6350000,00
10	6411927,50	5839305,80	5843768,00	6340000,00
11	5641533,80	5581999,68	5682856,52	6040000,00
12	6515199,90	5425005,38	5558345,50	7120000,00
13	6223471,10	5350892,83	5512354,20	7010000,00
14	5654464,50	4813988,97	5160524,43	5440000,00
15	5458665,70	4783454,34	5078302,46	5440000,00
16	5811499,60	3958340,15	3927334,09	3480000,00
17	5141377,90	3843130,27	3763072,10	3540000,00
18	4566967,90	3666413,30	3126926,13	3910000,00
19	4198858,50	3546315,54	3015436,90	3910000,00
20	4616767,40	4001353,31	4132320,13	3910000,00
21	4313517,00	3948198,30	4061367,41	3820000,00
22	4097571,20	3735875,81	3102195,34	3780000,00
23	3789333,70	3607503,72	2948618,11	3890000,00
24	2453148,10	3059545,62	2649637,58	3910000,00
25	2424468,50	2976006,16	2591137,39	3910000,00
26	5196396,20	4096746,68	5187719,50	4280000,00
27	6103216,10	4188110,88	5263467,15	4230000,00
28	3842857,70	4613182,81	4736666,48	4050000,00
29	3479420,50	4430289,72	4493041,22	3900000,00
30	7472025,30	4293417,61	4290708,54	4930000,00
31	5430672,30	4939331,32	5319781,08	4420000,00
32	4734630,90	4853929,57	5223906,06	4250000,00
33	4600307,90	4845004,29	5068099,73	4560000,00
34	3740205,20	4503891,18	4711373,07	4280000,00
35	2337905,80	2335431,38	3143605,23	2380000,00
36	2437884,80	2421977,81	3238809,80	2360000,00

S.NU.	GERÇEK MALİYET	EKKYR ile tahmin	ÇKA 1GK ile tahmin	BUS ile tahmin (Centroid)
37	3771216,80	3853871,57	5120136,32	4050000,00
38	4052095,90	3940398,84	5203641,49	4110000,00
39	1318001,00	1353834,61	1558643,37	1520000,00
40	1279502,30	1121337,17	1219801,90	1350000,00
41	1235615,80	1021252,89	1210025,13	1350000,00
42	1058498,90	999133,01	1374308,19	1400000,00
43	1126750,40	1130890,21	1399178,33	1360000,00
44	1139090,90	1410989,77	1214538,60	1400000,00
45	1299053,70	1450036,87	1223053,80	1390000,00
46	1886085,00	1709797,95	1554902,11	1540000,00
47	1456922,20	1401763,63	1470020,73	1700000,00
48	1563501,20	1445126,40	1480220,33	1720000,00
49	2170209,00	2636254,91	2132349,88	2260000,00
50	2016514,20	2503282,49	2067094,75	2230000,00
51	895282,20	977204,44	1265647,04	1370000,00
52	867025,50	953928,17	1260164,54	1380000,00
53	4824343,90	4389736,30	5655578,17	4820000,00
54	4341248,20	4276596,65	5572543,33	4900000,00
55	945196,70	1040622,29	1282696,46	1420000,00
56	1308105,30	1061973,53	1287241,90	1430000,00
57	1113974,60	865501,31	1188196,22	1380000,00
58	1223587,00	933260,74	1193228,31	1370000,00
59	8255510,50	7055777,07	6522502,33	7900000,00
60	5855706,40	5736400,74	5775197,93	6160000,00
61	1214366,60	1333095,49	1535694,66	1470000,00
62	1668236,80	1654265,55	1541965,68	1630000,00
63	2085565,60	2565780,08	2102197,44	2230.000,00