

ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMİ İLE ÖRNEK BİR TARİHİ YAPIDA ENERJİ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ (1)

Ebru ULAŞ SARIAYDIN*, Hicran Hanım HALAÇ**

Received: 09.01.2025; Final Text: 11.12.2025

Anahtar Sözcükler: Bina enerji performansı; tarihi yapı; çok kriterli karar verme metodu; TOPSIS; enerji iyileştirme müdahaleleri

1. Bu çalışma, Prof. Dr. Hicran Hanım Halaç danışmanlığında 9 Temmuz 2024 tarihinde tamamlanan “Enerji ve maliyet etkin tarihi yapı restorasyon sürecinin çok kriterli karar verme metodu ile belirlenmesi” başlıklı doktora tezine dayanmaktadır. Ayrıca, bu araştırma ESTÜ BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Kodu: 22DRP305

GİRİŞ

Mevcut süreçte içerisinde bulunduğumuz iklim krizi şartları, kültürel miras yapılarının iç ortam sıcaklıklarını etkilemekte, yapı malzemelerinde aşınma sebep olmakta ve bununla birlikte kullanıcı termal konforunda olumsuz ortamlar oluşturmaktadır (Cho vd., 2020; Onecha and Dotor, 2021). Modern binalara kıyasla nispeten düşük enerji performansına sahip tarihi yapılar için (Cho vd., 2020) güçlendirme ve yenileme müdahaleleri gerekli görülmekte ve buna yönelik çalışmalar giderek yaygınlaşmaktadır (Castaldo vd. 2017). Belirtilen sebepler doğrultusunda kültürel miras yapılarındaki enerji performans iyileştirme araştırmaları, alan yazını için önemli bir kapsam sunmakta ve bu kapsam içerisinde tarihi yapılar için uygun müdahale alternatifleri tartışılmaktadır. Tarihi binaların enerji rehabilitasyonunda uygun müdahale, hem enerji performansının güçlendirilmesini hem de binanın orijinal özelliklerinin korunmasını gerektirmektedir (Aste vd., 2012). Aynı amaçlar doğrultusunda, Avrupa Birliği’nin Interreg Alpine Space projesi ATLAS ile Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA-SHC) *Task 59 – Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy* çalışmaları kapsamında geliştirilmiş olan HİBERAtlas (2019) projesi, tarihi yapıların enerji tüketimini azaltmayı, iç konforu artırmayı ve estetik/koruma değerlerini zedelemeyen sürdürülebilir çözümler sunmayı ve sürece dahil olan tüm paydaşlara bilgi sağlamayı hedefleyen bir platform sunmuştur.

İki tarihi yapının enerji performans güçlendirmesini örneklediren diğer bir çalışma olan Kyritsi vd. (2025), müdahale tasarımlarının en başında tarihi yapıya ait geçmiş evrakların koruma önceliklerinin belirlendiğini, yapıdan sorumlu yerel koruma yetkilileri ile detaylı görüşmelerin gerçekleştirildiğini belirtmektedir. Bununla birlikte, tarihi yapıların bulunduğu alanlarda anket çalışmaları yürütülmekte ve bu yapıların öne çıkan özellikleri not edilmektedir. Tarihi yapıların enerji performansının değerlendirilmesinde geçmiş verilerin incelenmesi ilk aşama olmakla

* Corresponding Author; Institute of Graduate Studies and Research, Department of Architecture, Eskişehir Technical University, Eskişehir, TÜRKİYE.

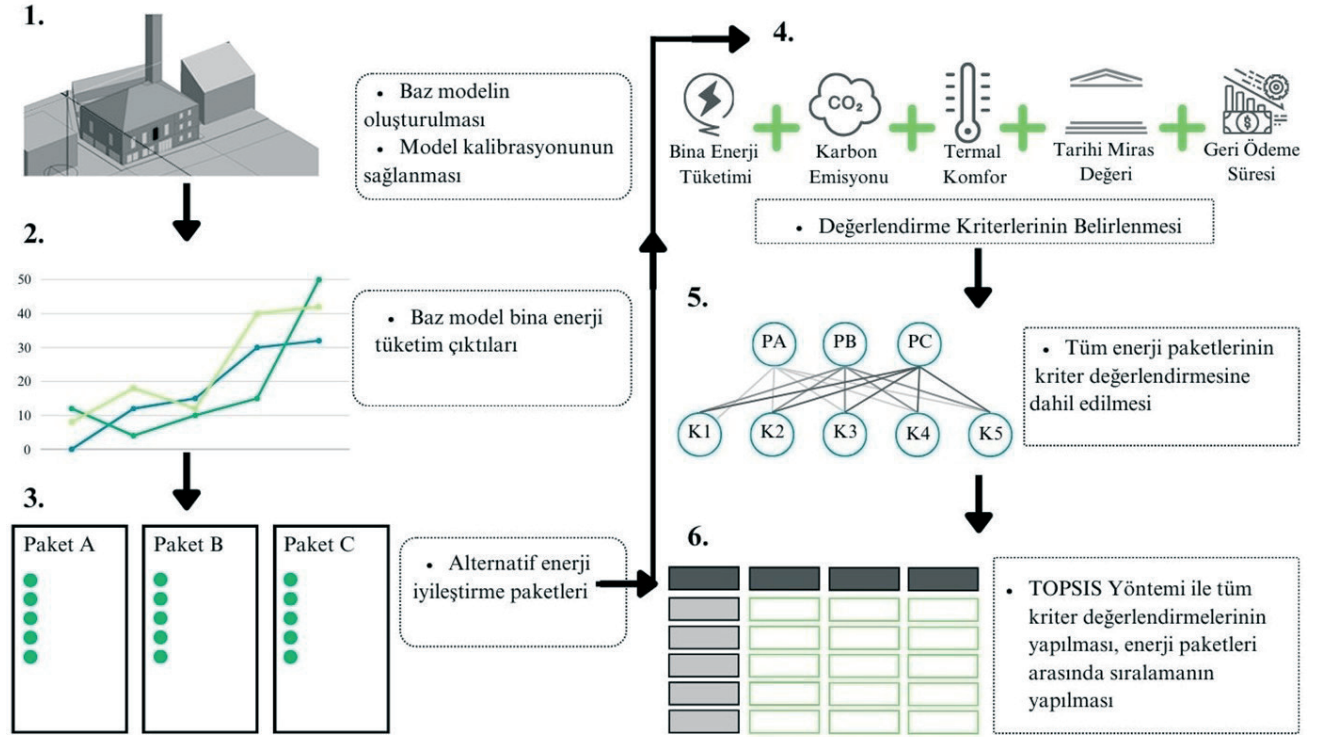
** Department of Architecture, Eskişehir Technical University, Eskişehir, TÜRKİYE.

birlikte yapının günümüzdeki durumunun tespiti de gereklidir. Bunun için yerinde izleme ve gözlem, ölçüm, sayısal analiz gibi tahribatsız yöntemler ya da numune alımı, karot alma, basınç testi gibi tahribatlı yöntemler kullanılabilen, malzeme, mukavemet ve iç ortam koşullarına yönelik değerlendirmeler yapılabilmektedir (Günaydın vd., 2022). Tarihi yapılara ait iç ortam koşullarının ölçümü ve belirli bir süre boyunca bu verilerin izlenmesi ve yapı kabuğuna dair gerçekleştirilecek ölçümler aracılığıyla bir tarihi yapının enerji ve konfora ilişkin performansının saptanması olanaklıdır. Yapının mevcut durumunun tespitinin ardından iyileştirmeye yönelik müdahale seçimleri gerçekleştirilebilmektedir. Tarihi değer hassasiyeti ile yürütülen çalışmalarda yapı üzerinde planlanan müdahaleler öncelikli olarak bina simülasyon modeli üzerinde test edilmekte ve müdahale sonrası enerji performans etkileri tartışılabilmektedir (Panakaduwa vd., 2024). Müdahalelerin enerji performans etkisi test edilecek simülasyon modeline, incelenen yapıya ait tüm özellikleri olabildiğince benzer ve eksiksiz olarak eklenmeli, gerçek yapı ile adaptasyonu sağlanmalıdır. Tarihi mirasa müdahale etmeden tarihi yapıların enerji performansının iyileştirilmesini konu alan Fedorczak-Cisak vd. (2020), doğru varsayımlar altında sorumlu bir tasarım yaklaşımını önermektedir. Tarihi binalarda yürütülecek enerji verimliliğine yönelik metodolojik yaklaşım, o çalışma içerisinde ele alınan tarihi binanın kendine has özelliklerini dikkate almalıdır. Her bir müdahale planı, her bir vaka özelinde dikkatle incelenmelidir (Grifoni vd., 2018). Bu durum, tarihi yapılarda uygulanması planlanan enerji etkin restorasyon müdahaleleri için özel bir inceleme yönteminin geliştirilmesini gerektirmektedir.

Bu çalışma, bir kültürel miras yapısında enerji performans iyileştirmesi için uygulanacak müdahaleler içerisindeki örnek vakaya uygun en iyi müdahale alternatifini bulmayı amaçlamaktadır. Mevcut çalışmada, sunulan alternatifler içerisindeki en yüksek düzeyde memnuniyet sunan paket araştırması için çok kriterli karar verme yöntemlerinden, (ÇKKV) TOPSIS tekniği kullanılmakta, tüm iyileştirme seçenekleri farklı kriterler kapsamlarında değerlendirmeye alınmaktadır. Aynı anda birden fazla alternatif çerçevesinde en iyi tercihin seçilmesinde kullanılan çok kriterli karar verme yöntemi, karar verme sorununu çeşitli ve çelişkili kriterlerle karakterize ederek karar vericilere en iyi durum çözümlerini belirleme tekniği sağlamaktadır (Selvan vd., 2023; Harputlugil vd., 2014). ÇKKV yaklaşımı, kullanıcıların karar vericiler olarak görülmesi gerektiğini savunmakta, söz konusu bir dizi seçimin her aşamasında seçilen alternatifin kullanıcıya en uygun potansiyeli, en yüksek kolaylığı ve en iyi versiyonu sağlamayı temel almaktadır. Çok kriterli karar verme yöntemleri, seçim, sınıflama ve sıralama olmak üzere problem ve tekniklerine göre kendi içerisinde üç gruba ayrılmaktadır. Seçim problemleri kapsamında kullanılan teknikler ile birden fazla alternatif arasından en faydalı olan araştırılmaktadır. Sınıflama yönteminde kullanılan teknikler ile alternatifler arasında gruplama yapılırken, sıralama tekniklerinde alternatifler kapsamında sıralama oluşturulmaktadır (Dalbudak ve Rençber, 2022).

YÖNTEM

Bu bölümün alt başlıklarında, ilk olarak vaka çalışmasına ait bilgiler ve vakaya ait simülasyon modeli oluşturma süreçleri paylaşılmaktadır (**Bölüm 2.1**). Örneklem yapı olarak seçilen tarihi caminin simülasyon modeli Design Builder uygulaması kullanılarak oluşturulmakta, gerçek yapıya en yakın ve



Resim 1. Çalışma yöntemine ait akış diyagramı (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için model kalibrasyonu sağlanmaktadır. İyileştirme alternatif müdahaleleri gerçekleştirilmeden önce kalibre baz model üzerinden örneklem yapıya ait mevcut enerji tüketim verileri elde edilmektedir. Bu sayede tüm müdahale iyileştirmelerinin etkileri baz model tüketim verileri ile kıyaslanabilmektedir (**Resim 1**). Ardından ikinci alt bölümde, enerji iyileştirme müdahaleleri ile oluşturulan alternatif paketler tanıtılmakta ve paket içeriklerine ait detaylar paylaşılmaktadır (**Bölüm 2.2**). İyileştirme paketlerinin karşılaştırması için oluşturulmuş kriter dizileri ve bu kriterler kapsamında TOPSIS yöntemi kullanılarak yürütülen değerlendirme kurgusu ise **Bölüm 2.3**'te aktarılmaktadır.

Mevcut araştırmada, alternatifler arasında en uygun alternatif seçimi için ÇKKV yöntemleri içerisindeki sıralama tekniklerinden TOPSIS yöntemi kullanılmaktadır. Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilen (Shyith vd., 2008) TOPSIS yaklaşımında öncelikle her bir alternatifin göreceli performansını değerlendirmek için bir dizi ilgili kriter tanımlaması yapılmaktadır. Ardından karar verici tarafından tüm alternatiflerin belirlenen kriterlerce karşılaştırması yapılmakta ve oluşturulan kriterlerin alternatifler üzerindeki etkisine sayısal değerler atanmaktadır. Tüm kriterler kapsamında elde edilen sayısal değerlerin sonuç verisi ile alternatifler arasında en pozitif ve en negatif seçim imkânı oluşmaktadır (Caruso vd., 2023). TOPSIS, alternatifler arasında nesnel sonuçlar kurmayı amaçlayan numaralı bir kurguya sahip olsa da alternatif değerlendirmesine dahil olan kriter ağırlıklandırma işlemi hem subjektif hem de objektif olarak yapılabilir. Subjektif ağırlıklandırma yönteminde, kriterlerin eşit ağırlıklandırması ve çalışmaya dahil olan karar vericilerin görüşleri doğrultusunda gerçekleştirilen ağırlıklandırma yöntemleri yer almaktadır. Objektif ağırlıklandırma yöntemlerinde ise standart sapma, CRITIC vb. yöntemler kullanılarak karar vericilerin subjektif etkisi en aza indirilmektedir (Yıldırım vd., 2018).

Bu çalışmada, literatürde de farklı örneklerine rastlanan (Mainali ve Silveira, 2015; Bandejas vd., 2025) karar verme sürecinde kullanılan kriterlerin tamamı için eşit ağırlıklandırma yöntemi kullanılmaktadır. Söz konusu yaklaşım, kriter önceliklerinin belirsiz ya da eşit değerde kabul edildiği durumlarda tercih edilmektedir. Bu çalışma için kabul alınan yöntem içeriğinde, analizlerde ele alınan 5 kriterle eşit önem atfedilmiş, kriter ağırlıklandırmalarındaki subjektif tutum sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte kriter ağırlıklarının karar sürecindeki etkisinin değerlendirilmesi için aynı karar problemi ve veri seti gelecek çalışmada AHP yöntemi ile birden fazla katılımcının/uzmanın dâhiliyeti ile ele alınacak, kriterler üzerinde ağırlık çalışması katılımcı görüşleri ile değerlendirilecek ve böylece her iki yöntemin aynı zamanda kriter ağırlıklandırmalarının çıktıları üzerindeki etkisi tartışılabilecektir.

Mevcut çalışma içerisinde birden fazla kriter çerçevesinde karşılaştırması incelenen enerji iyileştirme müdahaleleri 3 paket olarak sınırlandırılmaktadır. Tüm paketler beşer adet enerji iyileştirme müdahalesi içermektedir. Çok kriterli karar verme yaklaşımlarından TOPSIS yöntemi ile örneklem yapı üzerinde uygulanacak enerji iyileştirme müdahale paketlerinin karşılaştırılması için kriterler belirlenmektedir. Çalışma yöntem kurgusunun görselleştirildiği **Resim 1**'in 4. adımında paylaşılan değerlendirme kriterlerinde, tarihi binaların enerji performansının iyileştirilmesi amacıyla yayınlanan EN 16883 (2017) kılavuzu referans alınmış, kılavuzda yer alan ölçüm kriterleri bu çalışmaya dahil edilmektedir. Kriterler; yıllık toplam enerji tüketimi, karbon emisyonu, termal konfor, tarihi miras değeri ve geri ödeme süresi şeklindedir. Eşit ağırlıklandırma yöntemi ile tüm değerlendirme kriterleri aynı önem derecesinde kabul edilmektedir.

Örneklem Bina Simülasyon Modelinin Geliştirilmesi

Eskişehir'in Odunpazarı ilçesinde yer alan cami, adını aldığı Tiryakizade Süleyman Ağa tarafından 1778 yılında yaptırılmıştır. 1909 yılında tamir ve bakım gerektiren cami için restorasyon kararı alınmış ve cami, temelden itibaren yenilenmiştir. Altı adet işyeri mekânı bulunan cami, son restorasyonunu 2013 yılında gerçekleştirmiş zemin katı kafeterya üst katları cami fonksiyonu olarak günümüzde işlevini sürdürmektedir (**Resim 2**).

Ayrık nizam olarak planlanmış tarihi binanın Güney ve Doğu cepheleri trafiğe açık iki caddeye paraleldir. Yapı, kendi parseli içerisinde batı



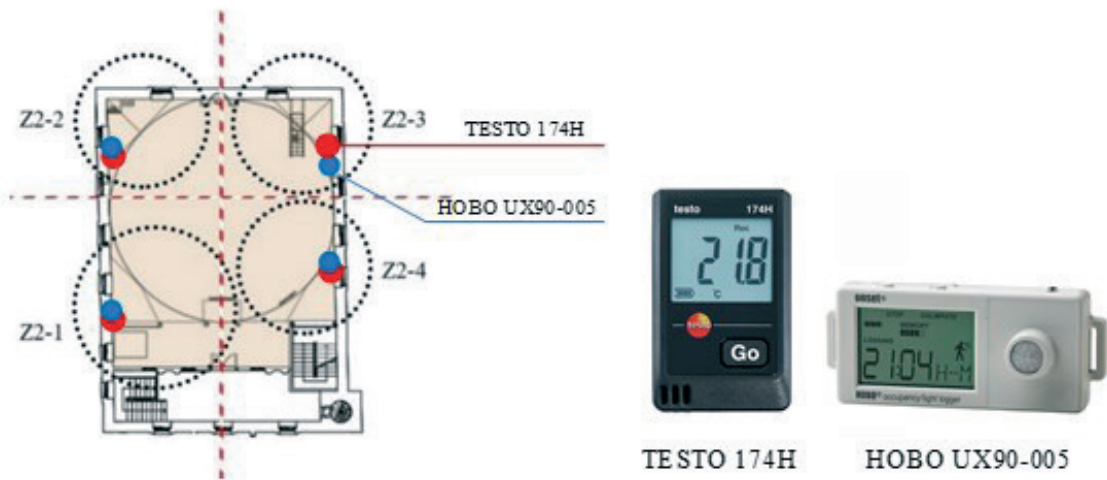
Resim 2. Çalışmanın örneklem binasına ait görsel (Kültür Envanteri, 2025).

cephesine bakan bir avluya sahiptir. Kafeteryanın girişi doğu cephesinden, caminin cemaat girişi zemin kat kuzey cephesinden ve kadınlar girişi ise batı cephesindeki avlu tarafından sağlanmaktadır. Zemin katta kafeterya bölümü ile birlikte camiye ait girişler bulunmakta olup üst katta son cemaat ve harim bölümü yer almaktadır.

İzlenen miras binasının simülasyon modelini oluşturmak için güçlü algoritmaları ve 3D mimari modelleme arayüzü nedeniyle DesignBuilder simülasyon aracı kullanılmıştır. DesignBuilder ile gerçekleştirilen bina modellemesinde ilk olarak bina geometrisinin ve çevresel verilerin işlenmesi gerekmektedir. Bina geometrisi, işlev, yerleşim, kat yüksekliği, hacim ve pencere-duvar oranı (WWR) verileri kullanılarak modellenmektedir. Mevcut çalışmada, farklı mekanlar ve birden fazla cepheye sahip ortak mekanlar içerisinde mekânsal zonlamalar oluşturularak, gerçekleştirilecek iklimsel farklılıklara önlem alınmıştır. Kafeterya (Z1), son cemaat bölümü (Z3) ve kadınlar mahfili (Z4) ayrı zonlar olarak modellenirken harim bölümü, mekân içindeki yerel termal davranışları yakalamak için kubbe eksenli boyunca dört bölgeye (Z2) ayrılmıştır. Bina geometrisi ile birlikte zonlama stratejisi, veri girişi için iyi hazırlanmış bir simülasyon modeline olanak sağlamıştır (**Resim 3**).

Örnekleme yapıya ait fiziksel veriler, kısa dönem tekrarlı periyodlar halinde yapı üzerine yerleştirilen veri kaydediciler ile sağlanmıştır. Yapı izlemeleri, 2023 yılının Mart, Nisan, Mayıs ve Ağustos aylarında, her ay için 20-30 gün aralığında izleme süreci yürütülmüştür. Mart ve Nisan aylarına ait ölçüm verileri üzerinden ısıtma sistemi ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Yapıda aktif soğutma sistemi bulunmaması ve yaz aylarında pencere ve kapıların kullanıcı kontrolünde çalıştırılması sebebiyle Mayıs ve Ağustos ayları yapıdaki serbest dönemleri temsil etmekte ve yapı kabuğu davranışına yönelik analizlere temel oluşturmaktadır. Literatürde, kısa süreli ölçüm (*short-term monitoring*) yönteminde, ölçüm süresinden ziyade verilerin alındığı zamanın daha önemli olduğu ve verilerin toplanmasında en iyi dönemin serbest dönemler olduğu belirtilmektedir (Abushakra ve Paulus, 2016). Serbest dönem (*swing season*), yapı içerisinde ısıtma ya da soğutma sisteminin çalışmadığı dönemleri kapsamakta ve yapı kabuğu davranışına ait en doğru izlenimleri yansıtmaktadır. Çalışma içerisindeki ölçüm takvimine, Abushakra ve Paulus'un belirttiği serbest dönem disiplini dahil edilmiş ve TS 825'e göre 3. bölge derece-gün sınıfında yer alan

Resim 3. Bina içerisindeki zonlama örneği (harim-Z2) ve zonlara yerleştirilen veri kaydediciler (Testo, 2024; HOBO, 2024).



Eskişehir ili için serbest dönemler revize edilmiştir. Sonuç olarak serbest dönem verileri olarak, Mayıs ve Ağustos ayı izleme verileri kullanılmıştır.

İç ortam sıcaklıkları, nem ve bina sakinlerinin mevcudiyetine ilişkin veriler için on iki adet TESTO 174H ve beş adet HOB0 UX90-005 veri kaydedici kullanılmıştır (**Resim 3**). Veri kaydedicilerin yerleşimi ve sayısı, binanın iki farklı mekânsal işlevindeki (kafeterya ve cami) doluluk, kullanım süresi ve taban alanındaki değişikliklere göre planlanmış ve tüm veri kaydediciler iç cephe yüzeyleri boyunca eşit bir yüksekliğe yerleştirilmiştir (Ulaş Sarıaydın vd., 2024). Sıcaklık ve nem veri kaydedicileri (*datalogger*) iç mekan verilerini 10 dakikalık aralıklarla kaydetmiştir. Doluluk veri kaydedicileri, bina sakinlerinin iç mekan termal ortamı üzerindeki etkilerinin daha geniş bir çözünürlüğünü yakalamak için bir dakikalık aralıklarla çalıştırılmıştır. Dış ortam sıcaklığı (°C), bağıl nem (%), güneş radyasyonu (W/m²), rüzgar hızı (m/s) ve rüzgar yönü (°), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bademlik Kampüsü'nde bulunan Davis Vantage Pro2 Meteoroloji İstasyonu kullanılarak, örnek binadan yaklaşık 500 m uzaklıkta 10 dakikalık aralıklarla izlenmiştir.

Ayrıca, doğru enerji performansı değerlendirmeleri için gerekli olan simülasyon modelindeki malzeme özelliği girdilerinin güvenilirliğini artırmak için TESTO 435-2 radyo frekans dış sıcaklık ölçüm probu ve thermocouple duvar sıcaklık probu kullanılarak yerinde U-değeri ölçümleri yapılmıştır (Sarıaydın vd., 2024). TESTO 435-2 ile uygulanan yöntemde U değeri hesabı için dış sıcaklık, iç ortam sıcaklığı ve ölçüm alınan elemanın iç yüzey sıcaklığına ihtiyaç duyulmaktadır. Ölçümün gerçekleşmesi ve güvenilir değerlerin elde edilebilmesi için iç ve dış ortam sıcaklığı arasında minimum 15°C farkın sağlanması gerekmektedir. 2023 yılı Mart ayında, örnek binaya ait yapı kabuğu elemanlarının ısı geçirgenlik katsayılarını (U değeri) belirlemek amacıyla TESTO 435-2 cihazı ile ölçümler yapılmış, ancak iç ve dış ortam sıcaklık farkının yeterli olmaması nedeniyle güvenilir veri elde edilememiştir. Bu nedenle, uygun çevresel koşulların sağlanması ve veri doğruluğunun artırılması amacıyla ölçümler 2022 ve 2023 yıllarında tekrar edilmiştir. Gerekli sıcaklık farklarının sağlandığı koşullarda ölçüm yapılan eleman üzerinde 1 saatlik veriler toplanmış ve TESTO 435-2 ile sağlanan U-değerleri simülasyon modeline aktarılmıştır. Model üzerinde, yapı kabuğunu oluşturan farklı elemanlar malzeme türlerine göre ayrıştırılarak, bağımsız biçimde modellenmiştir. Her elemanın fiziksel özellikleri, yerinde ölçüm çalışmasıyla tespit edilen U-değeri bulgularına uygun şekilde, şablon içeriklerinden atanarak model doğruluğu artırılmıştır.

Yerinde ölçüm verileri, bina tüketim verileri ve literatür verileri kapsamında edinilen girdiler ile baz model oluşturulmuştur. Kalibrasyon aşamasında, simülasyon çıktılarının ölçülen verilerle sistematik olarak hizalanması amaçlanmış, yinelemeli kalibrasyon yaklaşımı kullanılmış ve temel sonuçlar ile izlenen iç ortam parametreleri arasındaki belirsizlik azaltılmıştır. Chong, Gu ve Jia (2021) ve Gucyeter (2018) tarafından açıklanan yinelemeli yaklaşımı takip eden bu yöntem, her seferinde bir parametrenin ayarlanmasını ve özellikle kalibrasyon kriterleri karşılanmadığında model doğruluğu üzerindeki etkisinin değerlendirilmesini içermektedir. Kalibrasyon çerçevesi, ASHRAE Guideline 14 kriterlerine göre Ortalama Karekök Hatası (RMSE) ve Ortalama Çapraz Hata (MBE) değerlendirmeleri yoluyla ölçülmekte, standartta paylaşılan saatlik sınır değerlerinin (MBE için $\pm 10\%$, RMSE için 30%) sağlanması ile model kalibrasyonu kabul edilmektedir.

Enerji İyileştirme Müdahale Paketleri

Çalışma içerisinde planlanan alternatifli müdahale tasarımı Ulaş Sarıaydın ve Halaç (2024)'ın çalışmasında paylaşılan 3 farklı paket ile gerçekleştirilmektedir. Farklı müdahale konseptlerine sahip paketlerin her birinin içeriğinde 5 adet iyileştirme müdahalesi bulunmakta, müdahalelerden ikisi tüm paketlerde ortak tutulurken 3'er müdahalede değişken sağlanmaktadır. Bu ortak ve farklı müdahale tutumu, farklı konseptlere ait müdahale etkisini görünür kılmaktadır (**Tablo 1**).

Birinci müdahale paketi olan Enerji Performans İyileştirme Paketi-A (Paket A), güncel literatürde kullanımına rastlanan (Ulaş Sarıaydın ve Halaç, 2024) etkisi ispatlanmış müdahale içeriklerini kapsamaktadır. 3 alternatifli kurgulanan iyileştirme müdahale paketlerinden Paket A kapsamındaki M1 kodlu müdahale ile; mevcut yapıda kullanılan çift cam uygulamasında camlar arasındaki boşlukta hava yerine argon gazı uygulaması gerçekleştirilmektedir. Uygulama sonrası güneş enerjisi toplam geçirgenliğinde ve görünür ışık geçirgenliğinde değişiklik olmamakla birlikte camdaki U değeri, uygulama öncesi $2.665 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken argon gazı eklentisi ile $2.511 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak güncellenmektedir. Uygulanan müdahale ile yapı üzerindeki mevcut malzeme düşük bir U değeri iyileştirmesi test edilmektedir. U değerindeki düşük iyileştirme müdahalesi, basit çözüm örneği niteliğindeki durumu ile hazırlanan müdahale paketlerinin gerçekliğini artırdığı yönünde yorumlanmakta ve bu paketteki M1 müdahalesinde düşük iyileştirme etkisi korunmaktadır. M2 kodlu sızdırmazlık iyileştirmesinde yapı üzerinden ölçüm yapılamamış fakat literatür çıktıları doğrultusunda (Fard ve Nasiri, 2020; Cho vd., 2020; Blech vd., 2016) pencere ve kapı çerçevelerinden kaynaklanan sızırmalar için müdahale planlanmıştır. Planlanan iyileştirme müdahalesi kapsamında paket A içerisine pencere, kapı çerçevelerine kauçuk bant uygulaması gerçekleştirilmektedir (**Tablo 1**).

M3 müdahalesinde aydınlatma elemanlarında değişim söz konusudur. Mevcut durumda kullanılan akkor flamanlı lambalar kompakt floresan aydınlatmalar ile değiştirilmektedir. Enerji verimliliği sınıfı E-F olan akkor telli ampuller, görünür ışıktan daha çok ısı yaymakta ve verimi düşük ampul sınıfına girmektedir (Coşkun ve Öztop, 2016). Paket A içerisinde yer alan 2 aydınlatma elemanına ait kıyasta 20 W değerindeki kompakt floresan lambanın 100 W değerindeki akkor flamanlı ampule eş değer aydınlatma sağlamaktadır (Guan vd., 2016). Akkor flamanlı ampuller 84.000 W/m^2 aydınlatma güç yoğunluğuna (LPD) sahip iken kompakt floresan aydınlatmaları 15.000 W/m^2 aydınlatma güç yoğunluğuna (LPD) sahiptir. Aydınlatma teknolojisindeki gelişmelerin gerisinde olan floresan aydınlatmanın mevcut paket içerisindeki önerisi, paketler arası kademeli öneri tercihidir. Mevcut durumdaki akkor telli aydınlatma elemanı ilk kademe iyileştirmesi olarak Paket A içerisinde floresan aydınlatmaya dönüştürülmüştür. M4 ve M5 müdahalelerinde ise bina iç döşemelerinde ve çatı konstrüksiyonunda revizyonlar gerçekleştirilmektedir. Paket A içerisinde malzeme revizyonu ile birlikte uygulanacak yalıtım uygulamasında taş yünü önerilmektedir. Isı yalıtımı ile birlikte ses yalıtımında da etki ispatı söz konusu olan malzemenin ısı iletkenlik değeri $0,035-0,050 \text{ W/mK}$ aralığındadır (TS 825, 2013).

İkinci müdahale paketi olan Paket B'de literatürde kullanımına rastlanan fakat tarihi yapıda uygulanabilirliği halen araştırılan yenilenebilir enerji kaynakları ele alınmakta ve uygun müdahale yöntemleri araştırılmaktadır. Paket içerisinde paket A üzerine eklemenecek yenilenebilir enerji

Enerji Performans İyileştirme Paketi-A (Paket-A/PA)					Enerji Performans İyileştirme Paketi-B (Paket-B/PB)		Enerji Performans İyileştirme Paketi-C (Paket-C/PC)		
M1	Pencere cam değişimi- Çift cam uygulaması	6 mm düz cam + 13 mm argon gazı + 6 mm düz cam			6 mm düz cam + şeffaf güneş paneli + 6 mm düz cam		6 mm düz cam + Termokromik malzeme (FDM) + 6 mm düz cam		
		Güneş Işınım Toplam Geçirgenliği (SHGC)	Görünür Işık Geç. (VLT)	U-değeri (W/m² K)	Design Builder üzerinden modellenmiş ve belirtilen verilere ulaşılammıştır. Simülasyon araç girdileri kabul edilmiştir.		SHGC	VLT	U-Değeri
		0.704	0.781	2.511			0.569	0.409	2.130
M2	Sızdırmazlık İyileştirmesi	Harim		1.000ach		Harim		Harim	
		Kafeterya		1.000ach		Kafeterya		Kafeterya	
		Kadınlar M.		1.600ach		Kadınlar M.		Kadınlar M.	
		Son Cemaat		1.600ach		Son Cemaat		Son Cemaat	
		Kauçuk bant		Kauçuk bant		50 mm Poliüretan Köpük			
U-değeri 3.282 W/m K²		U-değeri 3.282 W/m K²		U-değeri 2.665 W/m K2					
M3	Aydınlatma elemanı revizyonu	Kompakt Floresan Aydınlatma		15.000 (W/m)²		LED lamba	7.500 (W/m)²	LED lamba	7.500 (W/m)²
M4	Zemin kaplama malzemesi revizyonu + Yalıtım uygulaması	Ahşap zemin kaplaması			0.582 U-değeri (W/m² K)	Ahşap z. kaplaması	0.582 U-değeri (W/m² K)	Ahşap z. kaplaması	0.220 U-değeri (W/m² K)
		Çerçeve çubuğu				Çerçeve çubuğu		Çerçeve çubuğu	
		Isı yalıtımı (Taş Yünü)				Taş Yünü		Isı yalıtımı (Aerojel)	
		Çerçeve çubuğu				Çerçeve çubuğu		Çerçeve çubuğu	
		Betonarme döşeme				Betonarme döşeme		Betonarme döşeme	
		Yapıştırıcı				Yapıştırıcı		Yapıştırıcı	
		Ahşap zemin kaplaması				Ahşap z. kaplaması		Ahşap z. kaplaması	
M5	Çatı malzemesi revizyonu + Yalıtım uygulaması	Ahşap kaplama		0.627 U-değeri (W/m² K)	Ahşap kaplama		Ahşap kaplama		0.340 U-değeri (W/m² K)
		Su yalıtımı			Su yalıtımı		Su yalıtımı		
		Isı yalıtımı (Taş Yünü)			Taş Yünü		Taş Yünü		
		Kiremit kaplama çıtası			Kiremit kaplama çıtası		Kiremit kap. çıtası		
		Kiremit kaplama			Kiremit kaplama		Kiremit kaplama		
					PV paneli				

Tablo 1. Alternatif enerji performans iyileştirme paketlerine ait müdahale içerikleri (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

içerikli müdahaleler yer almaktadır. Paket A'ya göre M1, M3 ve M5 müdahalelerinde revizyon söz konusudur (**Tablo 1**). Sık kullanılan müdahale içerikleri ile yenilenebilir enerji içeriklerini birlikte ele alan paket içeriğinde pencere camlarındaki revizyon için çift cam uygulamasında şeffaf güneş paneli (PBM1) ele alınmaktadır. 2019 yılında Michigan Eyalet Üniversitesi araştırmacıları tarafından bulunan tamamen şeffaf güneş panelleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi kullanımını geliştirmekte, panel pencere camı entegrasyonunu uygulanabilirlik ve estetik boyutta olanaklı hale getirmektedir. Aynı zamanda saydam yüzeylere uygulanabilirlik imkanı ışık geçirgenliği engellenmeden enerji kazancını sağlamaktadır. Şeffaf güneş paneli projesinde görev alan Lunt'ın açıklamasına göre, tasarlanan malzeme ultraviyole ve kızıl ötesi dalgalarını yakalayarak hapsedmektedir. Hapsedilen ışık, panelin dış hatlarında bulunan fotovoltaiik hücreler ile elektriğe dönüştürülmektedir (MSUTODAY, 2021). Mevcut paket içerisinde, güneş paneline ait şeffaflık camı pencereleri revizyonunda (PBM1) ele alınmakta, simülasyon içerisinde belirtilen özellikler manuel olarak aktarılmaktadır. Paket içeriğinde

Tablo 2. Simülasyona eklenen fotovoltaik panele ait mekanik özellikler (Ulas Sariaydin vd., 2024).

Mekanik Özellikler	
Hücre boyutu (mm)	52 x 156
Hücre sayısı	72
Hücre tipi	Polikristal
Ağırlık	8.0 kg
Panel boyutu (mm)	734x1001x34
Maks. güç	100 Wp
Çalışma aralığı	-40°C - +85 °C
Panel verimliliği (%)	17.2

bina sızdırmazlıklarında kauçuk bant iyileştirmesi (PBM2), aydınlatma elemanlarında LED aydınlatma (PBM3), döşeme malzeme revizyonu ve döşemelere yalıtım uygulamasında taş yünü (PBM4), çatı malzemelerinde revizyon ile birlikte batı ve güney (PBM5) cephe çatılarında fotovoltaik panel uygulaması gerçekleştirilmektedir. **Tablo 1**'de sunulduğu gibi paket B içeriğinde M5 müdahalesi ile çatı revizyonlarına yenilenebilir enerji kaynakları entegre edilmekte ve yenilenebilir enerji üretimi için tarihi örneklem yapı çatı yüzeyine entegre PV paneller önerilmektedir. **Tablo 2**'de çalışma için seçilen fotovoltaik panele ait fiziksel ve mekanik özellikler Sunmodule firmasının ilgili panel föyünden elde edilmekte ve kullanılan simülasyon programı içerisine yazar tarafından tanımlanmaktadır (SOLARWORLD, 2016).

Sunulan pakette batı ve güney cephe çatı yüzeylerine kurgulanan yenilenebilir enerji müdahalesinde 80 adet polikristal güneş PV paneli önerilmektedir. Önerilen paneller **Tablo 1**'de aktarıldığı gibi 100 Wp maksimum güce ve %17.2 verimliliğe sahiptir. PV sisteminde yönelim, maksimum enerji üretiminde önemli bir faktör olmakla birlikte, Quintana vd.'nin (2021) çalışmasına göre kuzey yarımkürede uygulanacak PV panellerde en uygun yönelim için güneye dönük uygulama gerekmektedir. Böylece PV panelin gün boyunca doğrudan ışık almasının sağlanacağı belirtilmektedir. Yönelime ek olarak PV verimliliğini pozitif etkileyen bir diğer faktör ise panelin eğim açısıdır. Darhmaoui ve Lahjouji'nin (2013) de çalışmalarında sunduğu ve uyguladığı gibi, kuzey yarımkürede yer alan PV'nin ayarlanmasında en etkili eğim açısı, coğrafi enleme eşit olduğu zaman için tespit edilmektedir. Mısır'ın kuzeyinde gerçekleştirilen çalışmada PV panellere uygulanan ve maksimum enerji üretimi gerçekleştirildiği belirtilen eğim açıları 30,1 ve 31,3'tür. Sunulan referans bilgiler doğrultusunda mevcut çalışma içerisinde, Türkiye'nin coğrafi enlemlerine uygun değer kabul edilerek panel eğim açısı 40 derece olarak ayarlanmıştır.

Üçüncü iyileştirme alternatifi, Paket C kapsamında ise verimli enerji kullanımında tasarruf amaçlayan yenilikçi, inovatif malzemeler tercih edilmektedir. İnovatif malzemelerden aerojel destekli yapı malzemeleri üretimi bina teknolojisi sektöründe önemli yer etmektedir (Berardi, 2018; Ganobjak ve Kralova, 2017; Del Curto ve Cinieri, 2020). İnovatif konsept ile hazırlanan Paket C içeriğinde, yenilikçi malzeme olarak aerojel yalıtım ve faz değiştiren malzeme içeriğine sahip termokromik cam uygulamaları dahil edilmektedir. Mevcut paket içerisinde aerojel yalıtım uygulamalarına döşeme ve çatı yalıtımlarında, faz değiştiren malzeme uygulamasına ise yapı üzerindeki cam revizyonunda yer verilmektedir (**Tablo 1**).

Çalışmanın simülasyon temelli olması nedeniyle, sunulan müdahalelerin saha uygulamalarına dair teknik detayları ele alınmamıştır. Buna karşın,

Yalıtım Malzemesi	Üretici Firma	Ticari Unvan	Yoğunluk (kg/m ³)	Isı Kapasitesi (J/kg-K)	Termal İletkenlik (W/m-K)
Aerojel	Aspen	Spaceloft Gray (Aspen)	146,00	1.000,00	0,0140
Aerojel Bazlı Kaplama	-	-	336,00	1.091,00	0,0510

Tablo 3. Aerojel yalıtım malzemesinin temel özellikleri (Aspen aerogels, 2024).

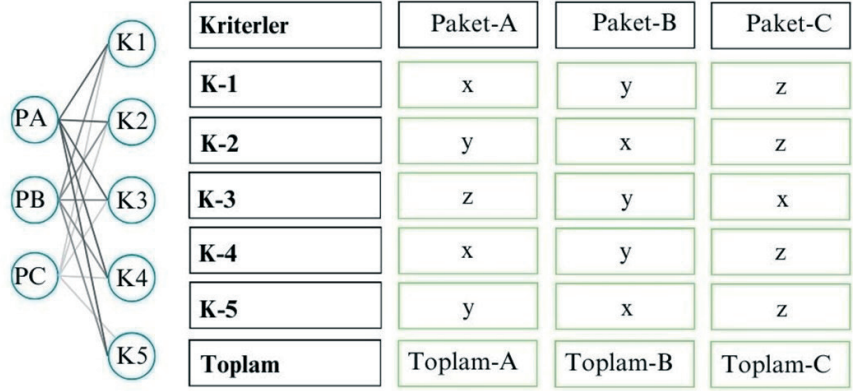
aerojel ve faz değiştiren malzemelerin yüksek uygulama maliyetleri, özel bakım gereksinimleri ve mevcut tarihi yapılara entegrasyonunda karşılaşılabilecek estetik veya yapısal uyumsuzluklar gibi çeşitli uygulama zorlukları göz önünde bulundurulmalıdır. Öte yandan, bu malzemelerin güncel projelerde giderek artan kullanımı gözlenmektedir (Ganobjak vd., 2020; Moraekip, 2025; Cuce vd., 2024). Teknolojik gelişmeler ve sektörün artan adaptasyonu sayesinde, bu zorlukların zamanla azalacağı, maliyetlerin düşeceği, malzemelerin daha uygulanabilir forma geleceği öngörülmektedir. Bunlarla beraber, belirtilen uygulamaların tarihi yapılardaki örneklerinin artması ve koruma önceliklerine uygun müdahale çeşitliliği sunması beklenmektedir. Dolayısıyla, bugünkü sınırlılıklara rağmen bu tür yenilikçi çözümlerin orta ve uzun vadede sürdürülebilir yapı ve koruma uygulamalarında önemli bir yer edineceği değerlendirilmektedir.

İnovatif, yenilikçi malzeme kullanımını konsept alan Paket C içerisinde pencere değişiminde termokromik malzeme kullanımı (PCM1), sızdırmazlık iyileştirmesinde pencere ve kapı etrafına poliüretan köpük müdahalesi (PCM2), aydınlatma elemanında revizyonunda LED aydınlatma (PCM3), döşeme malzemesi revizyonu ve döşemelere yalıtım uygulamasında aerojel teknolojisi destekli spaceloft gray (PCM4) ve çatı kurgusuna yine aynı şekilde Spaceloft Gray yalıtım eklentisi (PCM5) ile paket içeriği tamamlanmaktadır (**Tablo 1**). Simülasyon içerisine dahil edilen aerojel esaslı yalıtım malzemesi, Aspen firması tarafından detaylı özellikleri paylaşılmış “Spaceloft Gray” (Aspen/Aerogels) olarak belirlenmekte ve temel özellikleri **Tablo 3**’te aktarılmaktadır.

Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi ve Değerlendirme Kurgusu

Mevcut araştırmada alternatifler arasında en uygun alternatif seçimi için kullanılan TOPSIS yöntemi çalışma diyagramının 5. adımına denk gelmektedir (**Resim 1**). Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilen (Shyjith vd., 2008) TOPSIS yaklaşımında, karar verici tarafından tüm alternatiflerin belirlenen kriterlerce karşılaştırması yapılmakta, oluşturulan kriterlerin alternatifler üzerindeki etkisine sayısal değerler atanmakta ve tüm kriterler eşit ağırlıkta etki gücüne sahip kabul edilmektedir. Tüm kriterler kapsamında elde edilen sayısal değerlerin sonuç verisi ile alternatifler arasında en pozitif ve en negatif seçim imkanı oluşmaktadır (Caruso vd., 2023).

Mevcut çalışma içerisinde, 5 farklı kriter çerçevesinde planlanan değerlendirmede tüm paketler her bir kriter kapsamında birbirleri ile karşılaştırılmakta; iyileştirme müdahale paketlerine 1-3 aralığında puan atanmaktadır ve her kriter için eşit puan aralığı kabul alınmaktadır. Atama için seçilen puanlar özel bir anlam içermemekle birlikte, ardışık nitelik taşıyan ve eşit fark sergileyen görece olarak sıralama ifadesi sunmaktadır (Mainali ve Silveira, 2015; Bandeiros vd., 2025). Paketler içerisinde kritere en iyi cevap veren paket 3 puan almakta, en düşük performans sunan paket ise 1 puan almaktadır. Tüm kriterler kapsamında



Resim 4. Çalışma içerisinde kullanılan TOPSIS yönteminin görsel aktarımı (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

puan dağılımlarının belirlenmesinin ardından tüm paketlerin toplam puanına göre karşılaştırmalı değerlendirmeye ulaşılmaktadır. Uygulanan metodun görsel aktarımı olan **Resim 4**'te 1, 2, 3 puan değerleri x, y ve z ile simgelenmektedir. Her iyileştirme paketinin tüm kriterler kapsamındaki değerlendirmesi sonucu elde edilecek puanlar üzerinden enerji iyileştirme paketlerinde sıralama gerçekleştirilebilmektedir.

Mevcut çalışmanın kriterlerinin belirlenmesinde referans olan BS EN 16883 (2017) standardı, kültürel miras enerji performansı iyileştirmesinde bina ölçeği için kılavuz niteliği taşıyan Avrupa standartlarından biridir. Bu standart, söz konusu olan binanın gereksinimlerini, müdahale seçimlerini ve müdahale gerekliliklerine bağlı değerlendirmeleri sunan bir prosedür önermektedir. BS EN 16883:2017, binanın miras değerlerine uygun enerji verimliliği önlemlerinin nasıl belirleneceğine ilişkin yönlendirmeler sağlamaktadır. Standartta yer alan değerlendirilme ölçütlerini içeren bu çalışma, alternatif müdahale paketlerinin karşılaştırmasında 5 kriterli analiz yürütmektedir. Belirlenen kriterlerde nicel veri analizi mevcut olup, nicel çıktılarda simülasyon programının sunduğu özet raporlar kullanılmaktadır.

Tüm paketler üzerinde araştırılacak ilk kriter, yıllık toplam enerji tüketimidir (K1). İyileştirme müdahale paketlerinin uygulanması ile baz model yıllık toplam enerji tüketiminde gerçekleşen fark sonucu bu paketlerin enerji tüketimindeki iyileştirme performansı tespit edilmektedir. İkinci kriter (K2) ile müdahaleler sonucu oluşan baz model karbon emisyonundaki iyileşme incelenmektedir (**Tablo 4**).

Kriter No	Kriter İçeriği
K1	 Paketler arası yıllık toplam enerji tüketimi
K2	 Paketler arası karbon emisyonu
K3	 Paketler arası termal konfor
K4	 Paketler arası tarihi miras değeri
K5	 Paketler arası geri ödeme süresi

Tablo 4. Değerlendirmeye dahil olan kriterler (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

K3 kodu ile mevcut yapının termal konfor standartlarını sağlayan saat sıklığındaki iyileşme sorgulanmaktadır. Enerji iyileştirmesi hedefi ile oluşturulan müdahale paketlerinin, örneklem yapı olarak belirlenen binanın tarihi miras değerine etkisi dördüncü kriter kapsamında değerlendirilmekte (K4) ve paketler arası etki kıyaslaması yapılmaktadır. Çalışma değerlendirmesinin son kriterinde (K5) ise enerji iyileştirme paketlerinin toplam maliyetleri ve oluşturdukları enerji kârlılığına bağlı geri ödeme süreleri hesaplanmaktadır (**Tablo 4**).

BULGULAR

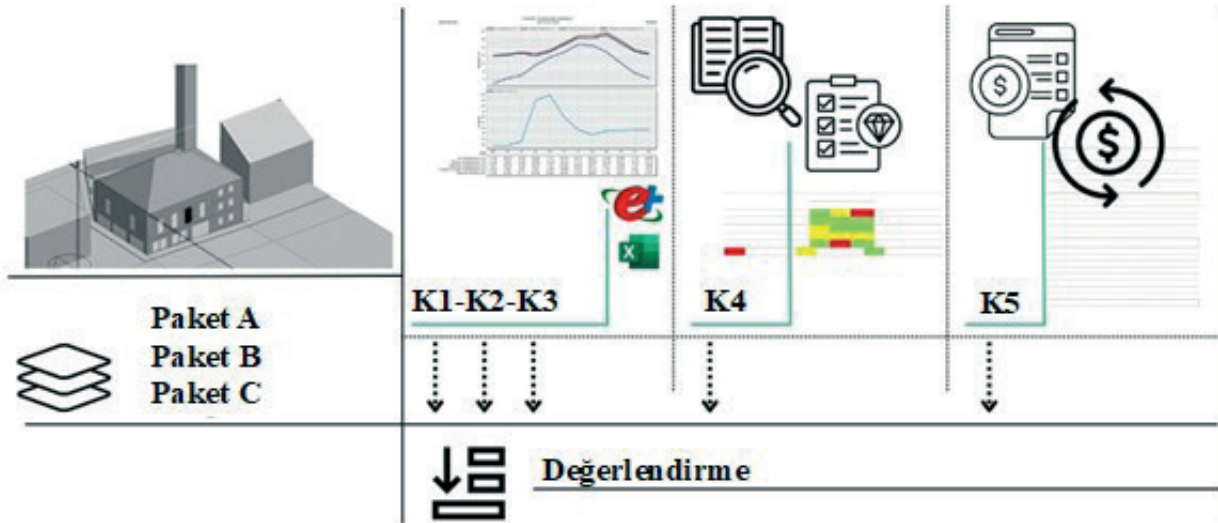
Bu bölümde, üç enerji iyileştirme paketinin tüm kriterler doğrultusundaki sonuçları sunulmakta ve paketler arası karşılaştırmalar yapılmaktadır. Her kriter değerlendirmesi sonucu üç iyileştirme paketine verilecek puanlar ile bölüm sonunda genel değerlendirilme yapılarak tarihi yapıda enerji iyileştirme performansına yönelik yorumlar aktarılmaktadır.

Resim 5'te tüm kriterlere ait verilerin kaynakları görsel olarak ifadelendirilmektedir. **Tablo 4'**te sunulan kriterlerden ilk üç kriter çıktıları DesignBuilder üzerinde modellenen ve Energy Plus sonuçlarının paylaşıldığı raporlardan elde edilmekte ve karşılaştırmalar bu nicel veriler doğrultusunda gerçekleştirilmektedir. Miras değeri karşılaştırmasını içeren 4 numaralı kriterde standart ve literatür verileri kullanılmaktadır. 5. kriter olan geri ödeme süresi hesabı, enerji iyileştirme paketlerinde yer alan müdahale maliyetleri çerçevesinde hesaplanmakta ve geri ödeme süresi, gelecek yıllardaki faiz öngörülerini doğrultusunda *future value* hesaplaması kullanılarak elde edilmektedir. Kriterlere ait veriler bu bölümün alt başlıklarında detaylı olarak paylaşılmakta ve her kriter sonucundaki enerji iyileştirme karşılaştırmaları bölüm içerisinde sunulmaktadır.

Paketler Arası Yıllık Toplam Enerji Tüketimi- K1

3 farklı iyileştirme paketinin baz model üzerindeki performans değerlendirmesinde ilk kriter, yıllık toplam enerji tüketimindeki iyileşme incelemesi olarak belirlenmiştir. **Tablo 5'**de iyileştirme müdahale paketleri sonrası baz modele ait yıllık toplam enerji tüketiminde oluşan farklar aktarılmaktadır. 138.871,90 kWh tüketim değerine sahip baz modelde

Resim 5. Çalışma kriterlerinin hesaplama yöntemlerine ait görsel ifade (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).



Tablo 5. İyileştirme müdahale paketlerinin oluşturdukları enerji tüketim farkları ve verim yüzdeleri (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

Müdahale Paketleri	Baz Model Tüketimi	Müdahale Sonrası Tüketim	Tüketim Farkı	Verim Yüzdesi
Paket A	138.871,9	59.949,4	78.922,5	%57
Paket B		47.676,3	91.195,6	%66
Paket C		56.793,8	82.078,1	%59

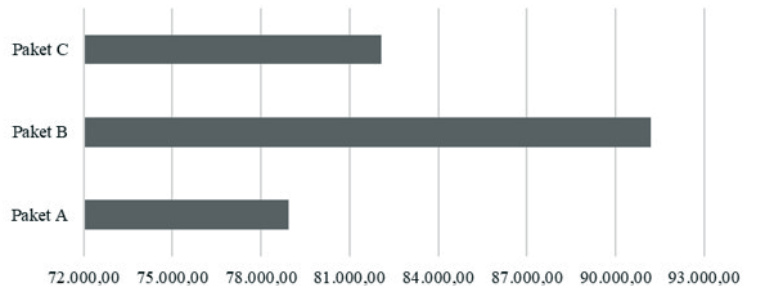
uygulanan iyileştirme müdahaleleri sonrası tüm paketler sonucunda iyileşme gözlenmekte ve yıllık toplam enerji tüketim değerinde azalma sağlanmaktadır. İyileştirme paketlerinin etki kıyasına göre en yüksek tüketim farkı, içeriğinde yenilenebilir enerji müdahalelerine sahip Paket B ile sağlanmaktadır.

Paket A ile baz model yıllık enerji tüketimi üzerinde %57 oranında iyileşme sağlanırken, Paket C ile fark oranı %59 olarak gözlenmektedir. En yüksek iyileşme potansiyeli sunan Paket B ile baz model tüketiminde %66 oranında düşüş sağlanmakta olup, elde edilen bu enerji verimine paket içerisinde dahil edilen fotovoltaik paneller ile sağlanan enerji kazancı da dahildir. Paketler ile sağlanan tüketim farklarının şematik gösterimi **Resim 6** ile sunulmaktadır.

2023 yılı iklim şartlarında gerçekleştirilen enerji performans iyileştirmelerine ait simülasyon sonuçlarına göre kurgulanan her üç paketin baz model üzerindeki iyileştirme potansiyeli %50 üzerindedir. Tüm paketlerin yüksek enerji iyileştirme potansiyelinin kendi içerisindeki kıyaslamasında en yüksek verim sıralaması Paket B-Paket C- Paket A şeklindedir. Bu durumda, mevcut kritere ait 1-3 aralığındaki puan ataması sonucu Paket B 3 puan, Paket C 2 puan ve Paket A 1 puan almaktadır.

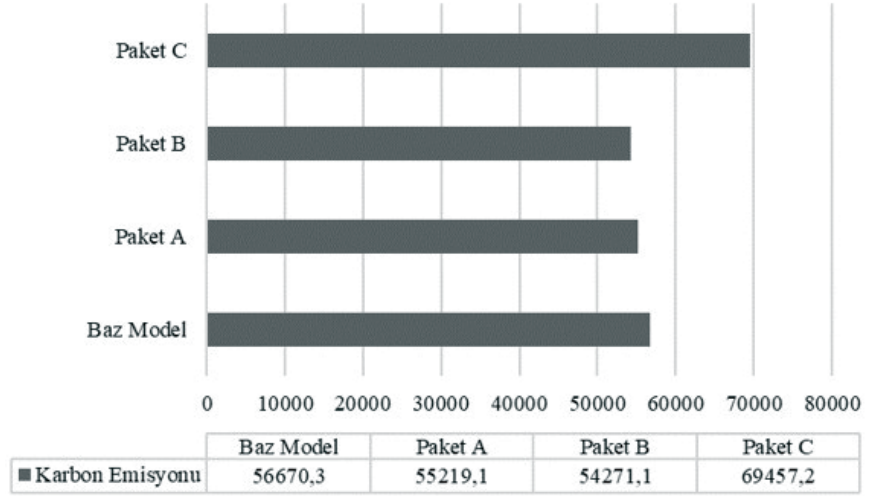
Paketler Arası Karbon Emisyonu- K2

2023 yılı ikliminde veri toplanan ve kalibre simülasyonu modeli oluşturulan baz modelin karbon emisyonu 56.670,30 kgCO₂ değerindedir. Paket A kapsamındaki müdahaleler ile baz modelin karbon emisyonunda 1.451,20 kgCO₂ değerinde iyileşme sağlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yer aldığı Paket B uygulaması sonrası karbon emisyonunda 2.399,20 kgCO₂ düşüş gözlenmekte, tasarlanan müdahaleler ile karbon emisyonunda iyileşme sağlanmaktadır. Müdahale içeriğinde inovatif malzemelerin yenilikçi kullanım örneklerine yer verilen Paket C uygulaması sonrası baz modelin karbon emisyonunda artış gözlenmektedir. Mevcut enerji iyileştirme paketi, 12.786,90 kgCO₂ değerinde yüksek emisyon artışı sergilemektedir. Tüm paketlerin baz model karbon emisyonu üzerinde oluşturdukları etkiler **Resim 7**'de görselleştirilmektedir.



Resim 6. Müdahale paketlerine ait baz model enerji tüketim farkları (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

	Paket A	Paket B	Paket C
■ Baz Model Tüketim Farkı	78.922,50	91.195,60	82.078,10



Resim 7. Müdahale paketlerine ait yıllık karbon emisyon karşılaştırması (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

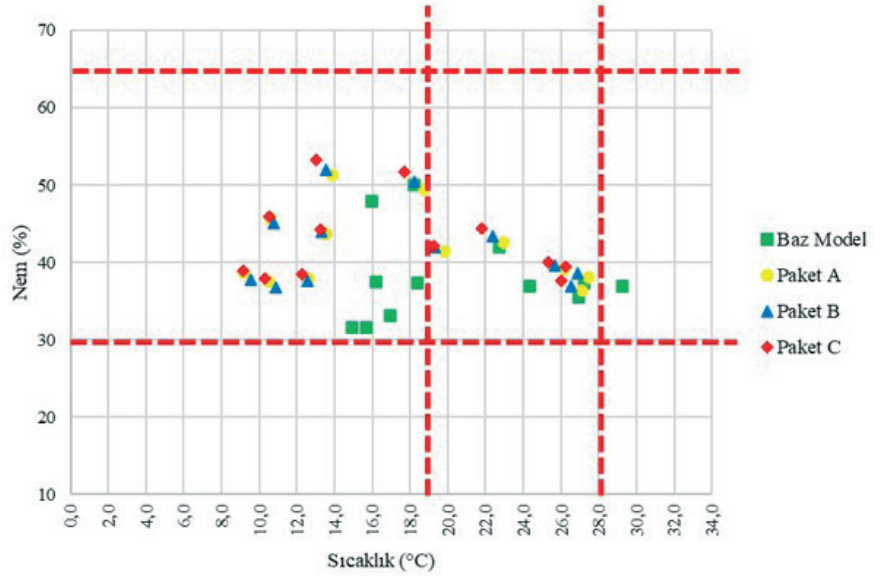
Tüm iyileştirme paketlerinin baz model emisyonundaki müdahalelerine göre kurgulanan puan dağılımında en yüksek puan olan 3 puanı Paket B almaktadır. Elde edilen emisyon değerlerine göre Paket A 2 puan ve Paket C 1 puan olarak mevcut kriter değerlendirmesi sonlandırılmaktadır.

Paketler Arası Termal Konfor – K3

Üçüncü kriter kapsamında, oluşturulan müdahale paketlerinin baz model ısı konforuna etkisi tartışılmaktadır. Uygulanan iyileştirme müdahalelerinin ardından yapı içerisindeki ısı konfor durumu analizi yapılmakta ve tüm paket etkileri karşılaştırılmaktadır. Isıl konfor değerlendirmelerinde kaynak niteliğine sahip ANSI/ASHRAE Standart 55 kılavuzunda paylaşılan ısı konfor sıcaklık-nem değer aralıkları mevcut bölümde referans alınmaktadır. Tüm müdahale paketlerinin uygulama sonrası ısı konfor değerlendirmeleri kılavuzda önerilen aralık çerçevesinde sorgulanmaktadır. Araştırma kapsamı boyunca, 2023 yılı Mart, Nisan, Mayıs ve Ağustos aylarında dört kısa dönem, tekrarlı bir izleme ile toplanmış olan iç ortam sıcaklıkları, nem ve bina sakinlerinin mevcudiyeti doğrultusunda hesaplanmış çaprazlamalar **Resim 8**'de görselleştirilmiştir. **Resim 8**'de tüm müdahale paketleri ile elde edilen modellerin aylık sıcaklık-nem değerleri ve kılavuzda belirtilen aralık çerçevesine göre konumları aktarılmaktadır.

Resim 4'te müdahale paketlerinin aylık sıcaklık nem ortalamalarının ASHRAE 55 kılavuzundaki değerlere teması birbirine yakın bulunmaktadır. Sağlıklı iklim analizi için tüm paketlerin iklim verileri, saatlik verilere dönüştürülmekte ve konfor aralığı dışında kalan saat sıklıkları karşılaştırmaktadır (**Resim 9**).

Baz modelin konfor dışı saat sıklığı %79 oranında bulunmuştur. Baz model üzerine Paket A müdahalelerinin uygulanması ile %24 oranında iyileşme gerçekleşmekte ve konfor dışı saat sıklığı %55'e düşmektedir. Paket B müdahaleleri ile %2 iyileşme sağlanırken, Paket C uygulaması ile iyileşme oranı %7 şeklindedir. Konfor dışı saat sıklığı karşılaştırmasına göre baz model üzerinde en etkin iyileşme Paket A ile sağlanmaktadır (**Resim 9**). Tüm tablo doğrultusunda, mevcut kriter kapsamında Paket A 3 puan, Paket C 2 puan ve Paket B 1 puan almaktadır.

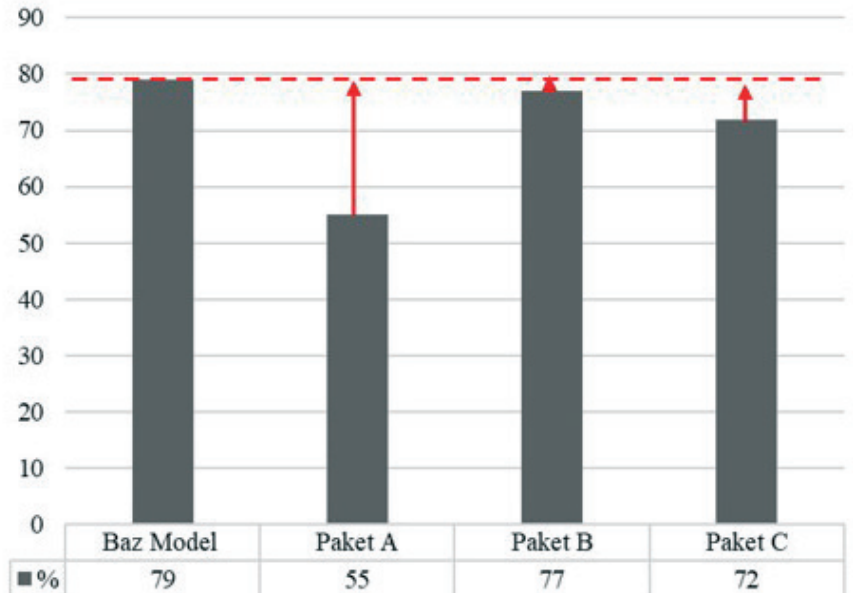


Resim 8. Müdahale paketlerine ait sıcaklık-nem dağılımları ve ASHRAE standardına göre konfor aralıklarındaki yerler (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

Paketler Arası Tarihi Miras Değeri- K4

Bu araştırmaya konu olan vaka çalışması, bir kültürel miras yapısı üzerinde gerçekleştirilmektedir. Yerinde ölçüm ve gözlemler yürütülen araştırma içerisinde kültürel miras dikkati tüm aşamalarda hassasiyetini korumakta, yapı üzerinde yapılan tüm incelemeler, kurul üyelerinin bilgi ve izinleri doğrultusunda yürütülmektedir. Belirtilen dikkat ve hassasiyet, örneklem yapı üzerinde geliştirilen müdahale kurgularında korunmaktadır. Bu nedenle incelenen müdahale paketlerinin değerlendirme kriterleri içerisinde bu dikkate uygun analizler yer almaktadır.

Birçok ülkede kültürel miras yapıları yıllık ve beş yıllık kontroller doğrultusunda incelenmekte ve belirli dönemlerde belirli ihtiyaçlar sonucunda sağlamlaştırma, onarım ve/veya yenileme gereksinimi ortaya



Resim 9. Müdahale paketlerinin termal konfor dışında kalan saat sıklıkları (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

çıkılmaktadır (Ahunbay, 2017). Koruma anlayışı doğrultusunda, müdahale gerekliliği mevcut yapıya uygulanacak restorasyon eylemlerinde tarihi yapının görsel bütünlüğü ve biçimine saygı gösterilerek, müdahale uygulanan döneme uygun malzeme seçimi gerçekleştirilmelidir. Farklı dönemlerde uygulanan müdahale içeriği, o dönemin izini taşıyarak yapı üzerinde tarihi kimliğin önüne geçmeden farklı dönem eki olduğunu belirtecek nitelik taşınmalıdır (Ahunbay, 2017).

Tüzük ve bildirgeler kapsamında desteklenen görüşler doğrultusunda, mevcut araştırma içerisinde tarihi yapı üzerine tasarlanan müdahale paketleri, her birinin içeriği kapsamında tartışmaya açılmakta ve her müdahalenin miras değerine etkisi doğrultusunda puanlama yapılmaktadır. Paketlere dahil olan müdahalelerin, tarihi yapının miras değeri ve özgün değeri üzerindeki etkisi, literatürde uzmanlar tarafından gerçekleştirilen nitel analizler ve vaka çalışmaları temel alınarak değerlendirilmektedir (Proto vd., 2023; Doğan Şahin vd., 2015). Bu çalışmalar doğrultusunda, çalışma içerisinde ele alınan her bir müdahale için uygunluk düzeyini temsil eden renk kodlu bir etki kategorisi (yeşil, sarı, kırmızı) belirlenmiştir. **Tablo 6**'da görselleştirilen bu değerlendirme, anket ve risk analizi çalışmalarında sık kullanılan renk skalası ile sunulmuştur (Hegazi ve Fouda, 2023; Sevieri vd., 2020; Qian vd., 2016). Bu sunuma göre; kırmızı renk: müdahalenin miras yapının tarihi kimliği üzerindeki etkisinin yüksek olduğunu, sarı renk: orta düzeyli etkileri, yeşil renk: düşük etkiyi temsil etmektedir.

Bu renk kodları, çalışmada sayısal puanlamaya dönüştürülerek her müdahale için bir skor belirlemektedir. Kullanılan skalaya göre; yeşil renk en az etki faktörünü nitelendirdiği için 3 puan, sarı renk 2 puan ve kırmızı renk tarihi kimliğe en yüksek etkiyi nitelendirdiği için 1 puan olarak değerlendirilmektedir (Giuliani vd., 2020). Her müdahale paketinde yer alan müdahale maddelerinin bu sistemle aldığı puanlar toplanarak, söz konusu paketin Paketler Arası Tarihi Miras Değeri-K4 kriteri altındaki toplam puanı hesaplanmaktadır. Böylece paketlerin hem paket içerikleri hem de miras değeri üzerindeki etkilerine göre karşılaştırmalı bir değerlendirme sunulmaktadır.

Tablo 6 verileri doğrultusunda müdahale paketlerine dair değerlendirme, yöntem tanıtımında belirtildiği gibi 1-2-3 puanları çerçevesinde yapılmakta ve her bir pakete **Tablo 6** referansı ile puan atanmaktadır. Bu durumda,

Tablo 6. İyileştirme müdahalelerinde tarihi kimlik değerlendirmesi (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

Müdahaleler		Değerlendirme			Referanslar
		Paket A	Paket B	Paket C	
M1	Pencere cam değişimi				(Sauchelli vd., 2014; Doğan Şahin vd., 2015)
M2	Sızdırmazlık iyileştirmesi				(Sauchelli vd., 2014; Doğan Şahin vd., 2015; Ibrahim vd., 2021)
M3	Aydınlatma elemanında revizyon				(Al-Habaibeh vd., 2022; Harrestrup ve Svendsen, 2015; Liu vd., 2017)
M4	İç döşeme rev. ve yalıtım uyg.				(Ibrahim vd., 2021; Al-Habaibeh vd., 2022; Joppolo vd., 2017)
M5	Çatı rev. ve yalıtım uyg.				(Joppolo vd., 2017; Lopez ve Frontini, 2013; Sauchelli vd., 2014; Doğan Şahin vd., 2015)
	Yüksek etki		Orta etki		Düşük etki

Tablo 7. Tarihi miras değerlendirmesi sonucu paketlere ait puanlar (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

Paket İsmi	Puan Değeri
Paket A	3
Paket B	1
Paket C	2

tarihi miras değeri tartışması Paket A, Paket B ve Paket C üzerinde gerçekleştirilmekte, yorumlar ve yorumlara karşılık gelen puan değeri **Tablo 7**'de paylaşılmaktadır. Bu yöntem, sayısal değerlendirme ile literatür referanslı nitel uzman görüşlerinin birleştirilmesini sağlamıştır. Ayrıca, literatür temelli bulguların karar sürecine sistematik biçimde entegrasyonuna olanak tanımıştır.

Literatürde kullanım örneklerinde sık rastlanan ve malzemeler üzerindeki müdahalesi diğer paket uygulamalarına göre minimum kabul edilen Paket A, en yüksek puan için uygun görülmektedir. Paket içeriğindeki ilk üç müdahalenin geri dönüştürülebilir özelliği ve dördüncü, beşinci müdahalelerde uygulamanın yapı iç yüzeyinde gerçekleştirilmesi dolayısıyla mevcut kriterde en yüksek puan Paket A için kabul edilmektedir. Çatı yüzeyine eklenen fotovoltaik panellerden dolayı 1 puan Paket B için uygun görülmektedir. Böylelikle, Paket C ise mevcut kriter çerçevesinde 2 puan alarak kriter değerlendirmesi tamamlanmaktadır (**Tablo 7**).

Paketler Arası Geri Ödeme Süresi- K5

Geri ödeme süresi hesabı, toplam maliyetin yıllık kazanca oranını ifade etmektedir. İyileştirme paketleri içeriğinde yer alan müdahalelerin maliyet hesabında Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu 2023 Birim Fiyat listesi temel alınarak oluşturulmuştur. Ancak bu listede yer almayan malzemeler için güncel piyasa araştırması yapılmış, sektör genelinde faaliyet gösteren birden fazla tedarikçi den alınan fiyat teklifleri değerlendirilmiştir. Belirli bir firmaya bağlı kalınmaması önceliğinde bu tedarikçilerin isimleri çalışma içerisinde belirtilmemiştir. Bunun yerine alınan fiyat teklifleri arasında istatistiksel ortalama yöntemi kullanılmış, 2023 yılı kuruna göre hesaplanan temsili birim maliyetleri müdahale paket hesaplamalarına dahil edilmiştir. Bu yaklaşımın, piyasa koşullarını yansıtan genel geçer ve karşılaştırılabilir bir maliyet tahmini sunması amaçlanmıştır.

ABD Doları ve Euro cinsinde paylaşılan fiyatlar 06.11.2023 tarihli döviz kuruna göre kabul alınmakta ve tüm malzeme fiyatları hem ABD doları hem de Türk Lirası cinsinden paylaşılmaktadır. Bununla birlikte çalışma içerisinde kullanılan maliyet verileri ve ekonomik kabuller belirli bir tarihe ve o dönemin piyasa koşullarına dayanmaktadır ve bu nedenle de hesaplamalar ekonomik değişkenlere duyarlı olmaktadır. Döviz kuru dalgalanmaları, malzeme fiyatlarındaki hareketlilik ve yıllık kazanç tahminlerindeki değişiklikler, geri ödeme süresi hesaplamasında anlamlı etkiler oluşturacaktır. Bu nedenle, farklı ekonomik senaryolar çerçevesinde analizlerin tekrarı, karar alma sürecinde etkilidir. Senaryo bazlı değerlendirmeler, yatırımın sürdürülebilirliğini ve aynı zamanda uygulanabilirliğini güvenilir kılmaktadır.

Sunulan geri ödeme hesaplarında, gelecek yıllardaki maliyet ve fatura değerlerine ilişkin öngörüler için gelecek değer faktörü (*Future Value*) kullanılmaktadır. Gelecek değer, belirli bir getiri oranı (faiz oranı) varsayılarak, kurgulanan yatırımın belirli bir süre sonraki durumunu,

$$FV = PV \times (1 + r)^n$$

FV= Gelecek değer (Future Value)

PV= Şimdiki değer (Present Value)

r= Faiz oranı

n= Yıl sayısı

Tablo 8. Gelecek değer hesap formülü (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

yatırım için ayrılan para miktarı ile bugün için hesaplanan harcamaların gelecek yıllar için karşılığını sunmaktadır (Rezaei vd., 2021; Souza De Almeida, 2022). Gelecek değer hesabında kullanılan formül **Tablo 8**'de paylaşılmaktadır.

Çalışma içerisinde enflasyon oranı olarak ticari yatırımlar için tercih edilen Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) kullanılmıştır. 2022 yılı itibarı ile gözlenen dalgalı enflasyon grafiği nedeniyle 2008-2023 yılları arasındaki yıllık değişim oranları kullanılarak (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024) 15 yıllık ortalama değer elde edilmiş ve çalışma içerisindeki gelir ve gider hesaplarında elde edilen TÜFE ortalama değeri kabul alınmıştır. Kullanılan TÜFE ortalaması %17,46 olarak hesaplanmıştır. Paketler içerisinde yer alan malzemelerin fiyat karşılıkları **Tablo 9**'da sunulmaktadır.

Tablo 9 verileri ile sunulan müdahale maliyetlerine göre paketler için yapılan harcamalar sunulmaktadır. Üç paket içerisinde maliyet olarak en düşük rakama sahip müdahale paketi birinci pakettir. Ardından maliyet sıralamasında ikinci paket gelmekte ve en yüksek maliyet tutarı üçüncü pakete ait olmaktadır. Paket A için toplam sistem maliyeti 11.873,13ABD x 30,50 TL=362.130,38 Türk Lirası olarak hesaplanmakta ve paket içi en yüksek harcama kalemi döşemelere uygulanacak yalıtım müdahalesine ait olmaktadır (M4). Paket B için toplam sistem maliyeti 32.440,37ABD x 30,50 TL=989.431,18 Türk Lirası olarak hesaplanmaktadır. Paket içi en yüksek kalem ise çatı yüzeyine yerleştirilen PV panellerden oluşan M5 müdahalesidir. Paket içerisinde PV panel maliyeti önemli bir paya sahiptir. En yüksek müdahale maliyetine sahip Paket C için toplam sistem değeri ise 58.057,86ABD x 30,50= 1.770.764,70 Türk Lirasıdır. İnovatif, yenilikçi malzemeler barındıran paket içerisinde en yüksek kalem, M4 müdahalesinde yer alan döşemeler için arojel yalıtım uygulamasıdır.

Paketlere ait geri ödeme süresinde gelecek değer hesaplaması kullanılmıştır. Gelecek değer, bugün için söz konusu olan gelir ya da gider olarak tanımlı para miktarının, belirlenen faiz oranı ile n olarak tanımlanan yıl sonrasındaki değerini (**Tablo 8**), belirlenen yıl sonundaki faizli rakamını sunmaktadır (Souza De Almeida, 2022). Paketlere ait geri ödeme hesabında, bugün uygulanacak olarak ele alınan müdahale paketinde, maliyet ve fatura tüketimleri gider sınıfında yer almakta ve bugünün (2024 Ocak) birim fiyat değerleri üzerinden hesaplanmaktadır. Toplam maliyetin yıllık kazanç oranı ile elde edilen geri ödeme hesabı içerisinde, mevcut çalışmada kazanç değerleri için paketler arası yıllık enerji tüketimleri dikkate alınmakta ve baz model enerji tüketiminde sağlanan fark değerleri (**Tablo 5**) kullanılmaktadır. Mevcut çalışmada, kabul edilen enflasyon oranına bağlı gelecek kazanç rakamlarının değişmesi nedeniyle geri ödeme süre hesabı, EXCEL üzerinden her yıl için hesaplanan fatura kazançları ile elde edilmektedir. **Tablo 10**'da kWh cinsinden sunulan enerji tüketim farkları gelecek her yıl için o yıla ait kazanç miktarı olarak hesaplanmakta ve bu noktada gelecek değer (FV) faktörü kullanılmaktadır.

Müdahaleler	Poz No	m/m ² /adet	Birim Fiyat	Tutar (TL-₺)	Tutar (ABD- \$)
PAKET-A	M1 Çift Cam-Argon Gazı	15.470.1004	76,00m ²	1568,38	119.196,88
	M2 Kauçuk Bant		57m (4 adet) (50mm-15m)	339,00	1.356,00
	M3 Floresan Aydınlatma	35.170.7201	20 adet	872,00	17.440,00
	M4 Taş Yünü (5cm)	10.130.3151	727,5m ²	215,00	156.412,50
	M5 Taş Yünü (5cm)	10.130.3151	315m ²	215,00	67.725,00
TOPLAM-Paket A				362.130,38₺	11.873,13\$
PAKET-B	M1 Çift Cam	15.470.1004	76,00m ²	1.006,38	76.484,88
	Şeffaf PV Panel (120-60-7mm)		32adet	115 Dolar	112.240,00
	Akü (150 Ah)		5adet	164,87 Dolar	25.142,10
	İnverter (5000W)		1adet	18.269,50	18.269,50
	M2 Kauçuk Bant		57m (4 adet)	339 (50mm-15m)	1.356,00
	M3 LED Aydınlatma	35.170.1108	20 adet	1.900,00	38.000,00
	M4 Taş Yünü (5cm)	10.130.3151	727,5m ²	215,00	156.412,50
	M5 PV Panel		80adet	4.823,84	385.907,20
	Akü (200 Ah)		15adet	9.150,00	137.250,00
	İnverter (10.000W)		1adet	38.369,00	38.369,00
	PV Panel		80adet	4.823,84	385.907,20
	TOPLAM-Paket B			989.431,18₺	32.440,37\$
PAKET-C	M1 Çift Cam-Güneş Kontrollü	15.470.1412	76,00m ²	1.746, 13	132.705,88
	M2 Poliüretan Köpük	15.305.1214	57m	179,76	10.246,32
	M3 LED Aydınlatma	35.170.1108	20 adet	1.900,00	38.000,00
	M4 Aerojel Dolgu	1220-760-7mm	727,5m ²	1.525,00	1.109.437,50
	M5 Aerojel Dolgu	1220-760-7mm	315m ²	1.525,00	480.375,00
TOPLAM-Paket C				1.770.764,70₺	58.057,86\$

Tablo 9. Müdahale paketlerine ait maaliyet hesapları (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

2024 yılı elektrik-gaz birim fiyatları ile hesaplanan değer üzerinden her yıl için gerçekleştirilen enerji tüketimindeki azalan hesap çıktıları, yıllık geri ödeme eksileri ile EXCEL üzerinden ilerletilmekte ve paketin kendini amorti ettiği yıl sonucuna tablo üzerinden ulaşılmaktadır. Her pakete ait mevcut geri ödeme hesapları **Tablo 10**'da paylaşılmaktadır.

Tablo 10, paketlere ait geri ödeme planını sunmaktadır. Yatırımın yapıldığı 2024 yılı sonrası 2025 yılı ile birlikte başlanan enerji kazanç getirisi, Paket A için 4 yılın sonunda kendisini amorti edeceğini göstermektedir. Böylece paket A'nın geri ödemesi 2028 yılında tamamlanmaktadır. Paket B'nin geri ödemesi 6.yılda gerçekleşmekte ve 2030 yılında, yapılan yatırım tamamen karşılanmaktadır. Bu durum, paket C için 8. yılda gerçekleşmekte ve 2032 yılında Paket C kendisini amorti etmektedir (**Tablo 10**). Sunulan hesaba göre Paket A'ya ait geri ödeme süresi 4 yıl, Paket B için 6 yıl, Paket C için ise 8 yıldır. En yüksek geri ödeme süresi Paket C'ye ait iken en kısa amorti süresi Paket A'ya aittir.

Paketler	Yıl		Gider kalemleri		Enerji (Fatura) Kazancı		Yatırım Getirisi	
			Yatırım Maliyeti + Fatura Tüketimi					
			TL	ABD	TL	ABD	TL	ABD
Paket A	0	2024	-682.913,59	-22.390,61	-	-	-	-
	1	2025	-682.913,59	-22.390,61	156.789,97	5.140,65	-562.123,62	-17.249,95
	2	2026	-562.123,62	-17.249,95	184.165,50	6.038,21	-341.958,12	-11.211,74
	3	2027	-341.958,12	-11.211,74	216.320,80	7.092,49	-125.637,32	-4.119,26
	4	2028	-125.637,32	-4.119,26	254.090,41	8.330,83	+128.453,09	+4.211,58
Paket B	0	2024	-1.310.214,39	-42.957,85	-	-	-	-
	1	2025	-1.310.214,39	-42.957,85	171.541,76	5.624,32	-1.138.672,63	-37.333,53
	2	2026	-1.138.672,63	-37.333,53	201.492,95	6.606,33	-937.179,68	-30.727,20
	3	2027	-937.179,68	-30.727,20	236.673,61	7.759,79	-700.506,07	-22.967,41
	4	2028	-700.506,07	-22.967,41	277.996,83	9.114,65	-422.509,24	-13.852,76
	5	2029	-422.509,24	-13.852,76	326.535,07	10.706,07	-115.974,17	-3.802,43
	6	2030	-115.974,17	-3.802,43	383.548,10	12.575,35	267.573,93	8.772,92
Paket C	0	2024	-2.091.547,91	-68.575,34	-	-	-	-
	1	2025	-2.091.547,91	-68.575,34	150.962,42	4.949,59	-1.940.585,49	-63.625,75
	2	2026	-1.940.585,49	-63.625,75	177.320,45	5.813,79	-1.763.265,04	-57.811,97
	3	2027	-1.763.265,04	-57.811,97	208.280,61	6.828,87	-1.554.984,43	-50.983,10
	4	2028	-1.554.984,43	-50.983,10	244.646,40	8.021,19	-1.310.338,03	-42.961,90
	5	2029	-1.310.338,03	-42.961,90	287.361,66	9.421,69	-1.022.976,37	-33.540,21
	6	2030	-1.022.976,37	-33.540,21	337.535,01	11.066,72	-685.441,36	-22.473,49
	7	2031	-685.441,36	-22.473,49	396.468,62	12.998,97	-288.972,74	-9.474,52
	8	2032	-288.972,74	-9.474,52	465.692,04	15.268,59	176.719,30	5.794,08

Tablo 10. Paketlere ait geri ödeme tablosu (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

Paket No			Paket A	Paket B	Paket C
Değerlendirme Kriterleri	K1	Yıllık toplam enerji tüketimi	1	3	2
	K2	Karbon emisyonu	2	3	1
	K3	Termal konfor	3	1	2
	K4	Tarihi miras değeri	3	1	2
	K5	Geri ödeme süresi	3	2	2
Toplam			12	10	9

Tablo 11. Tüm kriterler çerçevesinde müdahale paketlerine ait puan tablosu (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bir kültürel miras yapısının enerji performans incelemesi yapılan bu çalışmada, tek kriterli değerlendirmenin farklı seçim ihtimallerine yol açacağı sunulmaktadır. Özellikle mevcut örneklem yapı gibi özel dikkat gerektiren çalışmalarda, değerlendirme çeşitliliğinin önemi ve olası ihtimallerin kapsamlı inceleme gerekliliği öne çıkmaktadır. Beş kriter kapsamında değerlendirilen çalışmanın her bir kriter sonucu birbirinden farklı paket önerisi sunmaktadır. Bu nedenle mevcut çalışmanın sonuç cümleleri, çok kriterli karar verme yöntemindeki TOPSIS tekniği ile sağlanan tüm kriterlerin ortak değerlendirmesini sunmaktadır. Tablo 11, tüm kriterlerden elde edilen puan dağılımlarını ve her bir iyileştirme paketinin toplam puan değerini paylaşmaktadır.

Toplu kriter değerlendirmesine göre en etkin enerji iyileştirme performansı 12 puan değeriyle Paket A ile sağlanmakta, ardından 10 puan ile Paket

B gelmektedir. Üç müdahale paketi alternatifi ile gerçekleştirilen karşılaştırmada en düşük enerji iyileştirme performansı 9 puan ile inovatif malzemelerin kullanıldığı Paket C'ye aittir. Kriterlerin tekil değerlendirmesine bakıldığında yıllık toplam enerji tüketiminde (K1) Paket A, en düşük iyileştirme sunan paket iken toplu kriter değerlendirmesinde en yüksek performans değerine sahiptir. Bunun sebebi aynı paketin tarihi miras değeri (K4) kapsamındaki uygulanabilirlik potansiyeli ve kullanılan müdahalelerin düşük maliyetleri nedeniyle geri ödeme süresinin (K5) düşük bulunmasıdır. Bir diğer örnek, Paket B enerji tüketiminde (K1) en yüksek iyileştirme sağlanmasına rağmen uygulanan müdahalelerin bir kültürel miras yapısına uygulanabilirliği tarihi değer kriteri kapsamında (K4) alternatifler arasında zayıf bulunmaktadır. Verilen iki örnekte olduğu gibi tüm iyileştirme paketlerinin tekil ve çoklu kriter bulgularında farklılık mevcuttur. Tekil kriter kapsamında farklı bulgu erişimi, mevcut örneklem üzerinde alınacak optimum kararın birden çok kritere bağlı olduğunu ve çok kriterli karar verme metodunun (ÇKKV) gerekliliğini teyit etmektedir. Beş kriterli değerlendirme sonucunda, çalışma özelinde incelenen vaka kapsamında en uygun iyileştirme paketi olarak Paket A kararına varılmaktadır.

Mevcut çalışma, her bir vakanın kendi özelinde incelemesini ve sunulan çok kriterli değerlendirme modelinin ele alınacak her yapıda öznel çıktı sunacağını göstermektedir. Aynı zamanda bir vaka üzerinde doğru alternatif tercihindeki çok kriterli değerlendirmenin önemini örneklemektedir. Bu örnek vaka, kültürel miras yapıları üzerindeki gelecek çalışmalar için değerlendirme kapsamının genişletilmesini, belirlenen kriterler içerisine miras değeri dikkatinin dâhililiyesini önermektedir. Bununla birlikte, çalışmanın tek bir cami üzerinde gerçekleştirilmiş olması, bulguların diğer kültürel miras yapı tipolojilerine doğrudan aktarılabilirliğini sınırlandırmaktadır. Uygulanabilecek diğer kültürel miras bina tipolojileri; geleneksel konutlar, hanlar, sivil kamu yapıları veya endüstriyel miras örnekleri olduğu gibi miras binaları dışında yeni yapı tipolojilerine adaptasyonu için de uygulanması ve geliştirilmesi açık bir pozisyonudur. Farklı kullanım işlevlerine, mekânsal organizasyonlara ve yapım tekniklerine sahip bu tipolojilerde, hem müdahale paketlerinin etkinliği hem de kriterlerin önem ağırlıkları değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımının daha geniş bir örneklem üzerinde, çeşitli yapı türleriyle denenmesi; sunulan modelin uyarlanabilirliği, geçerliliği ve genellenebilirliği açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- ABUSHAKRA, B., PAULUS, M.T. (2016). An Hourly Hybrid Multivariate Change-point Inverse Model Using Short-term Monitored Data for Annual Prediction of Building Energy Performance, Part II: Methodology (1404-RP), *Science and Technology for the Built Environment* 22(7) 984-996.
- AHUNBAY, Z. (2017). *Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon*, YEM Kitabevi, İstanbul.
- AL-HABAIBEH, A., HAWAS, A., HAMADEH, L., MEDJDOUB, B., MARSH, J., SEN, A. (2022). Enhancing the Sustainability and Energy Conservation in Heritage Buildings: The Case of Nottingham Playhouse. *Frontiers of Architectural Research* 11(1) 142-160.

- ANSI/ASHRAE Standard 55. (2013). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA.
- ASPEN/AEROGELS. *Spaceloft. Thin, High-Performance Thermal Insulation for New and Retrofit Building Applications*. Northborough: Massachusetts. [https://www.aerogel.com/product/spaceloft/] Erişim Tarihi: (21.05.2024)
- ASTE, N., ADHIKARI, RD., BUZZETTI, M. (2012). Energy retrofit of historical buildings: An Italian case study. *Journal of Green Building* 7(4) 144-165.
- BANDEIRAS, F., GOMES, A., GOMES, M., COELHO P. (2025). Multi-criteria Sustainability Assessment of Energy Resources in the Energy Supply Chain of Smart City Ecosystems. *Energy Nexus* 18(22).
- BERARDI, U. (2018). Aerogel-enhanced Systems for Building Energy Retrofits: Insights from a Case Study. *Energy and Buildings* 159 370-381.
- BLECICH, P., FRANKOVIĆ, M., KRISTL, Z. (2016). Energy Retrofit of the Krsan Castle: From Sustainable to Responsible Design-A Case Study. *Energy and Buildings* 122 23-33.
- BS EN 16883 (2017). *Conservation of Cultural Heritage - Guidelines for Improving the Energy Performance of Historic Buildings*. [https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/189eac8d-14e1-4810-8ebd-1e852b3effa3/en-16883-2017] Erişim Tarihi (24.06.2025).
- CARUSO, M., COUTO, R., PÍNHO, R., MONTEIRO, R. (2023). Decision-making Approaches for Optimal Seismic/Energy Integrated Retrofitting of Existing Buildings. *Frontiers in Build Environment* 9 1-12.
- CASTALDO, VL., PISELLO, AL., BOARIN, P., PETROZZI, A., COTANA, F. (2017). The Experience of International Sustainability Protocols for Retrofitting Historical Buildings in Italy. *Buildings* 7(2).
- CHONG A, GU Y, JIA H (2021). Calibrating Building Energy Simulation Models: A Review of the Basics to Guide Future Work. *Energy and Buildings* 253:111533.
- CHO H., YUN B.Y., KIM Y.U., YUK H., KIM S. (2020). Integrated Retrofit Solutions for Improving the Energy Performance of Historic Buildings Through Energy Technology Suitability Analyses: Retrofit Plan of Wooden Truss and Masonry Composite Structure in Korea in the 1920s. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 168 1-18.
- COŞKUNER, S., ÖZTOP, H. (2016). Farklı Kullanım Alanlarının Aydınlatılması Verimlilik ve Temel İlkeler. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-dergisi* 1(1).
- CUCE, E., CUCE, P.M., WOOD, C., GILLOTT, M., RIFFAT, S. (2024). Experimental Investigation of Internal Aerogel Insulation Towards Low/Zero Carbon Buildings: A Comprehensive Thermal Analysis for a UK Building. *Sustainable and Clean Buildings, Universal Wiser Publisher* 1(1) 1-22. https://ojs.wiserpub.com/index.php/scb/article/view/4072
- DALBUDAK, E., RENÇBER, Ö.F. (2022). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Üzerine Literatür İncelemesi. *Gaziantep Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* 4(1) 1-16.

- DARHMAOUI, H., LAHJOUJI, D. (2013). Latitude Based Model for Tilt Angle Optimization for Solar Collectors in the Mediterranean Region. *Energy Procedia* 42 426–435.
- DEL CURTO, D., CINIERI, V. (2020). Aerogel-Based Plasters and Energy Efficiency of Historic Buildings. Literature Review and Guidelines for Manufacturing Specimens Destined for Thermal Tests. *Sustainability*, 12(22):9457 1-23.
- DOĞAN ŞAHİN, C.D., ARSAN, Z.D., TUNÇOKU, S.S., BROSTROM, T., AKKURT, G.G. (2015). A Transdisciplinary Approach on the Energy Efficient Retrofitting of a Historic Building in the Aegean Region of Turkey. *Energy and Buildings* 96 128-139.
- FARD, F.A., NASIRI, F. (2020). A Bi-objective Optimization Approach for Selection of Passive Energy Alternatives in Retrofit Projects Under Cost Uncertainty. *Energy and Built Environment* 1(1) 77-86.
- FEDORCZAK-CISAK, M., RADZISZEWSKA-ZIELINA, E., ORLIK-KOZDON, B., STEIDL, T., TATARA, T. (2020). Analysis of the Thermal Retrofitting Potential of the External Walls of Podhale's Historical Timber Buildings in the Aspect of the Non-deterioration of Their Technical Condition. *Energies* 13(18).
- GANOBJAK, M., KRALOVA, E. (2017). Impact Verification of Aerogel Insulation Paint on Historic Brick Facades. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 245.
- GANOBJAK, M., BRUNNER, S., WERNERY, J. (2020). Aerogel Materials for Heritage Buildings: Materials, Properties and Case Studies. *Journal of Cultural Heritage* 42 81-98.
- GIULIANI, F., DE FALCO, A., CUTINI, V., DI SIVO, M. (2020). A Simplified Methodology for Risk Analysis of Historic Centers: The World Heritage Site of San Gimignano, Italy. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment* 12(3) 336-354.
- GRIFONI, RC., PETRUCCI, E., TASCINI, S., PIERANTOZZI, M., LAPUCCI, D., MARCHESANI, GE. (2018). Energy Efficiency Improvements in Italian Historical Buildings: The Case Study of Ascoli Piceno. 2018 *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS EUROPE)*. Univ Palermo, Palermo, Italy.
- GUAN, L., BERRILL, T., BROWN, R.J. (2015). Measurement of Actual Efficacy of Compact Fluorescent Lamps (CFLs). *Energy and Buildings* 86 601-607.
- GUCYETER, B. (2018) Calibration of a Building Energy Performance Simulation Model via Monitoring Data. *Proceedings of the Building Performance Analysis Conference and SimBuild* (26-28 Eylül 2018), Chicago, USA; 542-549.
- GÜNAYDIN M., GENÇ A.F., ALTUNIŞIK A.C., HACIEFENDİOĞLU K., OKUR F.Y., OKUR E., ADANUR, S. (2022). Structural Condition Assessment of a Historical Masonry School Building Using Experimental and Numerical Methods, *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 12 1083-1113.
- HARPUTLUGİL, T., GÜLTEKİN, A.T., PRINS, M., TOPÇU, Y.İ. (2014). Architectural Design Quality Assessment Based on Analytic

- Hierarchy Process: A Case Study (1). *METU Journal of the Faculty of Architecture* 31(2) 139-161.
- HARRESTRUP, M., SVENDSEN, S. (2015). Full-Scale Test of an Old Heritage Multi-Storey Building Undergoing Energy Retrofitting With Focus on Internal Insulation and Moisture. *Building and Environment* 85 123-133.
- HEGAZI, Y.S. VE FOU DA, M. (2023). Creating a Risk Assessment Plan for Rainfall Impacts on Heritage Buildings Façades via Quantitative Methods. *Sustainability* 15(3) 1-20.
- HIBERATLAS (2019). Historic Building Energy Retrofit Atlas. [https://hiberatlas.eurac.edu/en/welcome-1.html] Erişim Tarihi (20.12.2024).
- HOB0 (2012). HOB0 Occupancy/Light (12m Range) Data Logger. [https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux90-006?srsId=AfmBOor_ciZq0KJdJxDw42H-Y9g9hBeNqq0FW4DvQdQ58MpVzaA2MFsg] Erişim Tarihi (11.03.2024).
- IBRAHİM, H.S.S., KHAN, A.Z., SERAG, Y., ATTIA, S. (2021). Towards Nearly-Zero Energy in Heritage Residential Buildings Retrofitting in Hot, Dry Climates. *Sustainability* 13(24) 1-36.
- JOPPOLO, C.M., DEL CURTO, D., LUCIANI, A., VALISI, L., BELLEBONO, M. (2017). Keeping It Modern, Making It Sustainable. Monitoring and Energy Retrofitting the Urbino University Colleges. *Energy Procedia* 133 243-256.
- KYRITSİ, E., KATSAPRAKAKIS, D., DAKANALI, E., YİANNNAKOUDAKIS, Y., ZIDIANAKIS G., MICHAEL, A., MICHOPoulos, A. (2025). Energy Renovation of Two Historical Buildings in Mediterranean Area. *Journal of Cultural Heritage* 71 106-113.
- KUTTY, N., BARAKAT, D., KHOUKHI, M. (2023). A French Residential Retrofit toward Achieving Net-Zero Energy Target in a Mediterranean Climate. *Buildings* 13(3) 833.
- Kültür Envanteri (2025). Tiryakizade Süleyman Ağa Camii. [https://kulturenvanteri.com/yer/tiryakizade-suleyman-aga-camii/] Erişim Tarihi (11.05.2025)
- LIU, L., KEOLEIAN, G.A., SAITOU, K. (2017). Replacement Policy of Residential Lighting Optimized for Cost, Energy, and Greenhouse Gas Emissions. *Environmental Research Letters* 12 1-10.
- LOPEZ, C.S.P., FRONTINI, F. (2013). Energy Efficiency and Renewable Solar Energy Integration in Heritage Historic Buildings, *Energy Procedia* 48 1493-1502.
- MAINALI, B., SILVEIRA, S. (2015). Using a Sustainability Index to Assess Energy Technologies for Rural Electrification, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 1351-1365.
- MORA EKIP, E.M. (2025). Thermochromic Glass Facades: A Sustainable Solution for Improving Buildings Energy Efficiency A Simulation-Based Study of an Office Building in Cairo, Egypt. *Journal of Engineering Sciences Faculty of Engineering Assiut University* 53(2) 126-152.

- MSUTODAY. (2021). Power Generation You Can See Through. Michigan State University. [<https://msutoday.msu.edu/news/2021/solar-glass-panels-installed>] Erişim Tarihi (24.05.2024).
- ONECHA, B., DOTOR, A. (2021). Simulation Method to Assess Thermal Comfort in Historical Buildings with High-volume Interior Spaces-The Case of the Gothic Basilica of Sta. Maria del Mar in Barcelona. *Sustainability* 13(5).
- PANAKADUWA, C., COATES, P., MUNIR, M. (2024). Identifying Sustainable Retrofit Challenges of Historical Buildings: A Systematic Review. *Energy and Buildings* 313.
- PROTO, R., RECCHIA, G., DRYHURST, S., FREEMAN, ALJ. (2023). Do Colored Cells in Risk Matrices Affect Decision-making and Risk Perception? Insights from Randomized Controlled Studies. *Risk Analysis* 43 2114-2128.
- REZAEI, M., KHALILPOUR, K.R., MOHAMED, M.A. (2021). Co-production of Electricity and Hydrogen from Wind: A Comprehensive Scenario-based Techno-economic Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(35) 18242-18256.
- SAUCHELLI, M., MASERA, G., D'ANTONA, G., MANZOLINI, G. (2014) ISIS Facchinetti: A Nearly Zero Energy Retrofit in Italy. *Energy Procedia* 48 1326-1335.
- SELVAN, S.U. SAROGLU, S.T., JOSCHINSKI, J., CALBI, M., VOGLER, V., BARATH, S., GROBMAN, Y.J. (2023). Toward Multi-species Building Envelopes: A Critical Literature Review of Multi-criteria Decision-making for Design Support. *Building and Environment* 231 1-21.
- SEVIERI, G., GALASSO, C., D'AYALA, D.F., JESUS, R., ORETA, A., GRIO, M.E.D., IBABAO, R. (2020). A Multi-hazard Risk Prioritisation Framework for Cultural Heritage Assets. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20(5) 1391-1414.
- SHYJITH, K., ILANGKUMARAN, M., KUMANAN, S. (2008). Multi-criteria Decision-making Approach to Evaluate Optimum Maintenance Strategy in Textile Industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 14(4) 375-386.
- SOLARWORLD. (2016). *Sunmodule-solar SW 100 poly RGP*. [<https://www.solarage.com/wp-content/uploads/2016/07/sunmodule-off-grid-poly-solar-panel-100-rgp2.pdf>] Erişim Tarihi (02.06.2024).
- SOUZA DE ALMEIDA, M., GIMENES, R.M.T., FURTADO, P.S., POERSCH, L.H., WASIELESKY, W., FOES, G.K., CARRIJO-MAUAD, J.R. (2022). Economic Analysis of Intensive and Super-intensive Litopenaeus Vannamei Shrimp Production in a Biofloc Technology System. *Boletim do Instituto de PESCA* 48 1-12.
- T.C. Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change (2024). *Construction and Installation Unit Prices*. [<https://webdosya.csbl.gov.tr/db/yfk/icerikler/1--2024-b-r-m-f-yatl-ar-20240603-1019-20240603093641.pdf>]. Erişim Tarihi (24.05.2024).
- Testo (2024). Testo 174 H - Mini Sıcaklık ve Nem Veri Kaydedicisi (Data Logger). [<https://www.testo.com/tr-TR/testo-174-h/p/0572-6560>] Erişim Tarihi (25.11.2024)

- TS 825. (2013). *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara. [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/cf3e258fbdf3eb7_ek.pdf] Erişim Tarihi (11.05.2024).
- ULAS SARIAYDIN, E., GUÇYETER, B., HALAC, HH. (2024). Planning the Monitoring Process and Energy Performance Evaluation in Historical Buildings: The Case of Tiryakizade Süleyman Ağa Mosque. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 39(2) 943-958.
- YILDIRIM, M., ALTAN, İ.M., GEMİCİ, R. (2018). Kurumsal Yönetim ile Finansal Performans Arasındaki İlişkinin Entropi Ağırlıklandırılmış TOPSIS Yöntemi ile Değerlendirilmesi: BİST'te İşlem Gören Gıda Ve İçecek Şirketlerinde Bir Araştırma. *Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi* 11(2).
- QIAN, K., SUN, J., CHEN, H., ZHANG, J. (2016). Visual Analysis Method for Cultural Heritage Site Risk Assessment. *Journal of Visualization* 19 503-514.
- QUINTANA, S., HUANG, P., SAINI, P., ZHANG, X. (2021). A Preliminary Techno-economic Study of a Building Integrated Photovoltaic (BIPV) System for a Residential Building Cluster in Sweden by the Integrated Toolkit of BIM and PVSITES. *Intelligent Buildings International* 13(1) 51-69.

Received: 09.01.2025; Final Text: 11.12.2025

Keywords: Building energy performance; historical building; multi-criteria decision-making method; TOPSIS; energy retrofit

ENERGY PERFORMANCE ASSESSMENT OF A SAMPLE HISTORICAL BUILDING BY USING MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHOD

The construction sector, which has a significant share in high energy consumption, brings building energy performance retrofit researches to the forefront in the literature. With the increasing number of energy performance retrofit studies in the last 20 years, retrofit intervention alternatives have been enriched. In this study, energy retrofit interventions were tested on a historic building and it was aimed to investigate the adaptation of alternative interventions to this historic building. The most efficient package among the alternative energy retrofit packages for the historic building was evaluated using multi-criteria decision making (MCDM). The improvement effect of three different intervention packages on the base model was analysed within the framework of five criteria. Annual total energy consumption, carbon emission, thermal comfort, historical heritage value and payback period were used to evaluate the retrofit packages. The improvement intervention packages analysed within the scope of each criterion are given scores using the TOPSIS approach of the multi-criteria decision-making method and the ranking of the packages is provided with numerical data. The total scores obtained from all criteria and the comparison of the improvement intervention packages are presented. As a result of the study, different findings were observed with single and multiple criteria evaluations. This confirms that the optimum decision to be taken for studies conducted on a sample depends on multiple criteria. It exemplifies the importance of multi-criteria

evaluation in choosing the right alternative in a case study. At the same time, the current study method, which includes more than one criterion, quantitatively presents the importance of the criterion of harmony with the historical structure as well as energy efficiency in the interventions to be applied in historical buildings.

ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMİ İLE ÖRNEK BİR TARİHİ YAPIDA ENERJİ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Yüksek enerji tüketiminde önemli bir paya sahip olan inşaat sektörü, bina enerji performans iyileştirmesi araştırmalarını alan yazınında odak haline getirmektedir. Son 20 yılda artan enerji performans iyileştirme çalışmaları ile birlikte iyileştirme müdahale seçeneklerini zenginleşmektedir. Bu çalışmada enerji iyileştirme müdahaleleri bir tarihi yapı üzerinde test edilmekte, ele alınan alternatif müdahalelerin bu tarihi yapıya uyumluluğunun araştırması amaçlanmaktadır.

Ele alınan tarihi yapı için alternatif enerji iyileştirme paketleri içerisinde en verimli paket değerlendirmesi, çok kriterli karar verme yöntemi (ÇKKV) ile sağlanmaktadır. Üç farklı müdahale paketinin baz model üzerindeki iyileştirme etkisi, beş kriter çerçevesinde analiz edilmektedir. İyileştirme paketlerinin değerlendirmesinde; yıllık toplam enerji tüketimi, karbon emisyonu, termal konfor, tarihi miras değeri ve geri ödeme süresi kriterleri kullanılmaktadır. Her kriter kapsamında analiz edilen iyileştirme müdahale paketlerine ÇKKV metodunun TOPSIS yaklaşımı kullanılarak puan atamaları yapılmakta ve paketlerin sıralaması sayısal veriler ile sağlanmaktadır. Tüm kriterlerden elde edilen toplam puanlar ile iyileştirme müdahale paketlerinin karşılaştırması sunulmaktadır. Çalışma sonucunda, tekil ve çoklu kriter değerlendirmeleri ile farklı bulgu erişimi gözlenmiştir. Bu durum, bir örneklem üzerinde yürütülen çalışmalar için alınacak optimum kararın birden çok kritere bağlı olduğunu teyit etmektedir. Bir vaka üzerinde doğru alternatif tercihindeki çok kriterli değerlendirmenin önemini örneklemektedir. Aynı zamanda birden fazla kriterin dahil olduğu mevcut çalışma metodu, tarihi yapılarda uygulanacak müdahalelerde enerji verimliliği kadar tarihi yapı ile uyum kriterinin önemini niceliksel olarak sunmaktadır.

EBRU ULAŞ SARIAYDIN; B.Arch, PhD. (Integrated PhD)

Received her B.Arch in architecture from the Faculty of Architecture at Eskişehir Anadolu University in 2017. Earned her PhD degree in architecture from Eskişehir Technical University. Major research interests include the documentation and conservation of historic buildings and improving energy efficiency in historic buildings. e.ebruulas@gmail.com

HİCRAN HANIM HALAÇ; B.Arch, M.Sc, PhD.

Received her B.Arch in architecture from the Faculty of Architecture at Eskişehir Anadolu University in 1996 and earned her MSc in architecture form at Gazi University (2002). Earned her PhD degree in art history from Eskişehir Anadolu University (2010). Major research interests include the documentation and conservation of historic buildings. hhhalac@eskisehir.edu.tr

