



# BİR İLKÖĞRETİM BİNASININ YAŞAM DÖNGÜSÜ ENERJİ VERİMLİLİĞİ DEĞERLENDİRİLMESİ

*Assessment of the Life Cycle Energy Efficiency of a Primary School Building*

**Nazanin MOAZZEN**  
**Mustafa Erkan KARAGÜLER**  
**Touraj ASHRAFİAN**  
**Özge AKTÜRK**

## ÖZET

Enerji verimliliği, hayatımızın önemli bir parçası haline gelmiştir ve tüm ülkelerin sosyal ve ekonomik gelişiminin üzerinde olumlu bir etkisi olduğu açıktır. Bu konu, Türkiye'de, özellikle bina sektöründe yakıt taleplerine olan bağımlılığın artması nedeniyle kritik bir konu haline gelmiştir. Binaların yaşam döngüsü değerlendirmesinde kullanılan ve çok yüksek değerlere ulaşan enerji ihtiyacı, malzemelerin üretimi, ulaşımı, imalat ve geri dönüşümü sürecinde gereken, mekanik sistemler ve aydınlatma tarafından tüketilen, bakım, onarım ve yıkım için kullanılan enerjiyi içermektedir. Genel olarak, Yaşam Döngüsü Enerji (YDE) ihtiyacı, bina kullanım süresinde ihtiyaç duyulan enerji ile birlikte üretim, ulaşım, yapım, yıkım ve geri dönüşüm süreçleri için gereken enerji miktarı olarak özetlenebilir. Üretim, ulaşım ve imalat sürecinde kullanılan enerji gömülü enerji olarak adlandırılmaktadır.

Okullar, konut dışı bina sektörünün toplam enerji tüketiminin yaklaşık yüzde 15'inden sorumlu tutulmaktadır ve bu yüzden ilgili sektörün enerji verimliliğini artırmak adına çok önemli bir konuma sahiptirler. Yapım öncesi ve esnası, kullanım süreci ve yıkım için kullanılan enerji miktarları kıyaslandığında, kullanım sürecinde tüketilen enerjinin diğer enerji tüketimlerinden çok daha yüksek bir miktar olduğu görülmektedir. Bu yüzden, yaşam döngüsü enerji tüketimini ve CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmak için, binaların kullanım süresince tüketilen enerji en aza indirilmelidir.

Bu çalışmada, bir binanın enerji etkin iyileştirilmesinde mimari önlemlerin uygulanması ile gömülü enerji ve kullanım süresince enerji tüketimleri üzerinde yoğunlaşmaktadır ve bu sayede düşük CO<sub>2</sub> emisyonu ve yüksek enerji performansına sahip bir eğitim binası elde etmek için yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Simülasyon yolu ile olan yaklaşım yöntemi, İstanbul'da bir tip okul binası üzerinde uygulanmıştır ve kullanım süresindeki birincil enerji tüketimi, dinamik simülasyon araçları olan EnergyPlus ve DesignBuilder yardımıyla hesaplanmıştır. Sonraki adımlarda binanın cephesinde farklı mimari enerji verimliliği önlemleri uygulanıp, önerilen eylemlerin YDE tüketimi ve Yaşam Döngüsü CO<sub>2</sub> (YDCO<sub>2</sub>) emisyonları üzerindeki etkisi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) yöntemine göre değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yaşam Döngüsü Enerji Değerlendirmesi, Okul Yapısı, Enerji Verimliliği, Enerji Tüketimi, Yaşam Döngüsü CO<sub>2</sub> Emisyonları.

## ABSTRACT

Energy efficiency has become a crucial part of human life, which has an adverse impact on the social and economic development of any country. In Turkey, it is a critical issue especially in the construction sector due to increase in the dependency on the fuel demands. The energy consumption, which is used during the life cycle of a building, is a huge amount affected by the energy demand for material and building construction, HVAC and lighting systems, maintenance, equipment, and demolition. In general, the Life Cycle Energy (LCE) needs of the building can be summarised as the operational and embodied energy together with the energy use for demolition and recycling processes.

Besides, schools alone are responsible for about 15% of the total energy consumption of the commercial building sector. To reduce the energy use and CO<sub>2</sub> emission, the operational and embodied energy of the buildings must be minimised. Overall, it seems that choosing proper architectural measures for the envelope and using low emitting material can be a logical step for reducing operational and embodied energy consumptions.

This paper is concentrated on the operating and embodied energy consumptions resulting from the application of different architectural measures through the building envelope. It proposes an educational building with low CO<sub>2</sub> emission and proper energy performance in Turkey. To illustrate the method of the approach, this contribution illustrates a case study, which was performed on a representative school building in Istanbul, Turkey. Energy used for HVAC and lighting in the operating phase and the energy used for the manufacture of the materials are the most significant parts of embodied energy in the LCE analyses. This case study building's primary energy consumption was calculated with the help of dynamic simulation tools, EnergyPlus and DesignBuilder. Then, different architectural energy efficiency measures were applied to the envelope of the case study building. Then, the influence of proposed actions on LCE consumption and Life Cycle CO<sub>2</sub> (LCCO<sub>2</sub>) emissions were assessed according to the Life Cycle Assessment (LCA) method.

**Key Words:** Life Cycle Energy Assessment, School Building, Energy Efficiency, Energy Consumption, Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions.

## 1. GİRİŞ

Dünyada enerji tüketimindeki hızlı büyüme sonucunda, enerji kaynaklarının tükenmesi ve küresel ısınma gibi önemli çevresel problemler konusundaki endişeler her geçen gün artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre son yirmi yılda birincil enerji %49, CO<sub>2</sub> emisyonları %43 ve yıllık sıcaklık ortalaması 2 °C civarında artış göstermiştir [1]. Yapı sektörü yeryüzündeki enerji tüketiminin ve CO<sub>2</sub> salınımının üçte birinin daha fazlasından sorumludur, bu yüzden enerji verimliliği bu sektörde oldukça önemlidir. Ayrıca bu sektörde enerji açısından verimli olmayan çok sayıda mevcut bina nedeniyle enerji verimliliğinin artırılması ve enerji tüketimindeki artışın yönetilmesi ve sınırlandırılması en önemli konular arasında yer almaktadır. Özellikle, gelişme amacı ile olmayan durumlarda ve yer sıkıntısı olmayan şehirlerde mevcut binaların yenilerinin yapılması amacıyla yıkılması, çevresel etkiler, maliyet, süre vb. durumlardan dolayı doğru bir yaklaşım değildir. Ancak enerji verimliliğinin artırılması amacı ile iyileştirme çalışmalarında daha düşük enerji kullanımını içeren binayı elde etmek için malzeme üretimi, inşaat, işletme, yıkım ve dönüşüm aşamaları, başka bir deyiş ile binanın tüm yaşam döngüsü ele alınmalıdır ve ele alınmadığı takdirde doğru sonuç elde edilemeyecektir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD); hammadde çıkarma, üretim, kullanım, elden çıkarma ve geri dönüşüm de dahil olmak üzere, ürünlerin veya işlemlerin tüm yaşam döngüleri boyunca çevresel performanslarını bilimsel olarak analiz etmek için gerekli bir araçtır. Bu nedenle, YDD'de çevresel etkileri değerlendirmek için sıklıkla "beşikten mezara" yaklaşımı kabul edilir [2]. Yaşam döngüsü çalışmaları kavramı, esas olarak 80'li ve 90'li yıllar içerisinde gelişmeye başlamıştır. Sonuç olarak, bu yöntem, yenileme ve binaların yeni inşaatlarının daha verimli olması ve daha az yer kaplaması konusunda daha verimli olabilir. YDE analizi bir binanın ömrü boyunca tüm enerji girdilerini açıklayan bir yaklaşımdır [3]. Bu çalışmanın sistem sınırları, aşağıdaki aşamaların enerji kullanımını içerir; üretim, işletme ve yıkım. Üretim aşaması, yeni binaların yapımı ve tadilatlarında kullanılan teknik tesislerin imalatını ve taşınmasını içerir. İşletme aşaması, binanın içindeki konfor şartlarının kullanım ömrü boyunca sürdürülmesi ile ilgili tüm faaliyetleri içerir. Son aşama olan, yıkım aşaması ise, binanın yıkılmasını ve sökülmüş malzemelerin depolama alanlarına veya geri dönüşüm tesislerine nakledilmesini içerir. YDE; gömülü, yapım, kullanım ve yıkım enerjilerini içerir. Binada ve bileşenlerinde kullanılan tüm malzemelerin gömülü enerjisi hesaplandıktan sonra, yapım aşamasında harcanan enerji ve daha sonra kullanım aşamasında ihtiyaç duyulan enerji ile birlikte yıkım enerjisi de hesaba katılmalıdır. Ancak genel olarak duruma bakıldığında kullanım süresinde tüketilen enerjinin, binaların YDE'sinin yaklaşık % 80 – 90'ı kadar önemli bir paya sahip olduğu ve ardından gömülü enerjinin %10-20 oranında bir paya sahip olduğu, yıkım ve diğer işlemlerin enerjisinin ise az miktarda olduğu için ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Konfor koşullarını sağlamak ve HVAC, sıcak su kullanımı, aydınlatma ve ev aletleri için gerekli enerji de dahil olmak üzere binaların bakımını yapmak için işletme enerjisi gereklidir. Yıkım enerjisi; binaların kullanım ömrünün sonunda yıkılması, malzemenin depolama alanlarına veya geri dönüşüm tesislerine taşınması için gerekli olan enerjidir [3]. Enerji performanslarının iyileştirilmesine yönelik farklı bina tipolojisinin YDE'si hakkında birçok çalışma vardır. Ramesh vd. tarafından konut ve ofis binaları dahil 13 ülkede 73 örnek değerlendirilmiştir [3].

Ding [4] Avustralya orta öğretim okullarının YDE değerlendirmesini tartışmıştır. New South Wales eyaletindeki 20 devlet ortaokulunun toplam enerji tüketimini incelemek için YDE analizini kullanmıştır. Sonuçlar, enerji tüketiminin derin bir analizi için model teşkil etmiş ve okullar için çevresel performans ilkeleri oluşturulmuştur. Mangan vd. [5], YDE ve yaşam döngüsü maliyet verimliliği ile ilgili olarak Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri için konut bina performanslarını araştırmıştır. Bu çalışmada, binaların yaşam döngüsü enerjisini, ekonomik ve çevresel performanslarını değerlendirmek için, konut enerji performansının iyileştirilmesinde kullanılan bazı önlemler belirlenmiştir. Bu çalışmaya göre YDE'sinin İstanbul ve Antalya'da %18, Ankara'da %21, Diyarbakır'da %17 ve Erzurum'da %22 düşürülme potansiyeli vardır.

Eğitim binaları, her ülkenin temelini oluşturmanın yanında, binalarda tüketilen enerjide önemli paya sahiptir. Örneğin bu binalar, İngiltere'de konut dışı binaların toplam enerji tüketiminin yüzde 15'inden sorumlu tutulmaktadır [6]. Öte yandan, eğitim binaları diğer bina türlerine kıyasla bütçe ve gelir sıkıntısı yaşamaktadırlar. Enerji verimli teknolojilerin binalarda 80'lerden sonra kullanılmaya başladığını ve Türkiye'de binalarda enerji performansını doğrudan etkileyen tek bir standardın, TS825'in olduğunu ve bu standardında 2000 yılından sonra zorunlu hale geldiği göz önünde bulundurulduğunda, okul binaların iyileştirmesinin ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı istatistiklerine göre, 2017-18 eğitim öğretim yılında Türkiye'de 55495 faal okul bulunmaktadır. Türkiye nüfusunun çoğunluğu gençlerden oluştuğu için, bir akademik yıl boyunca neredeyse dört kişiden biri zamanının çoğunu okulda geçirmektedir [7].

Eğitim binalarının yenilenmesi, sera gazı emisyonu ve enerji maliyetlerinin azaltılması, iş yaratma ve pazar alımı yoluyla ekonomik faydaların artması da dahil olmak üzere, yoğun enerji, çevresel ve ekonomik faydalar sağlayabilir. Bu çalışmada eğitim binaları için temel bir modeli temsil etmekte ve hem enerji tüketimini hem de CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için uygun iyileştirme senaryolarını tanımlamak için bir örnek üzerinde yaşam döngüsü analizini uygulamaktadır. Bu çalışmanın amacı, eğitim binalarında enerji performansının ve çevresel etkilerinin iyileştirilmesine yönelik pratik çözümler geliştirmektir. Stratejiler yaşam döngüsü çerçevesinde karşılaştırmalı bir yöntemle değerlendirilmektedir.

## 2. Araştırma Metodu

YDD yönteminin yapısı dört ana aşamadan oluşur; ilk aşama, hedef ve kapsamın tanımı, diğer aşamalar sırasıyla, yaşam döngüsü envanteri, etki değerlendirmesi ve yorumlanmasıdır. YDD yöntemi, çevresel etki değerlendirmesi için kriter olarak YDE ve YDCO<sub>2</sub> analizi için de uygulanabilir [8]. Çalışmanın temel amacı, Türkiye'deki eğitim binalarının YDCO<sub>2</sub> emisyonlarını dikkate alarak YDE performansını ve çevresel performansı değerlendirmektir. Örnek çalışma binasının işletim enerjisi ve karbon emisyonlarının modellenmesi ve hesaplanması, DesignBuilder ve Energy Plus simülasyon araçları kullanılarak yapılmıştır.

### 2.1 Konunun Tanımı ve Çalışmanın Kapsamı

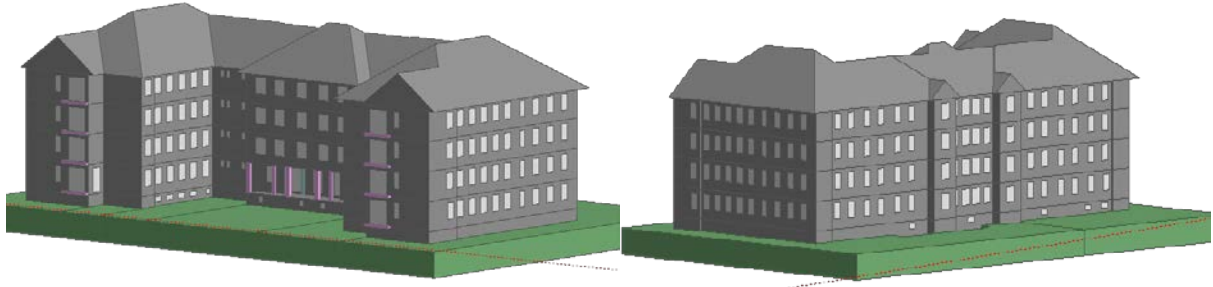
Çalışma, enerji verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik çeşitli mimari senaryoların, YDE tüketimi ve bir binanın YDCO<sub>2</sub> emisyonu üzerindeki etkisinin değerlendirmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Çalışma kapsamında, ilköğretim binaları analiz için seçilmiştir. Analizler boyunca, toplam gömülü ve işletim süresi boyunca enerji kullanımı ve binanın yaşam döngüsü aşamasına ilişkin CO<sub>2</sub> emisyonu, yaşam döngüsü envanteri çerçevesinde kantitatif olarak belirlenecek ve araştırılacaktır. Bir binanın yaşam döngüsü aşaması, ürünü, inşaatı, kullanımı ve kullanım ömrünün sonu aşamalarını içerir [9]. Yıkım, atıkların / yıkım malzemelerinin taşınması, atık işlemlerini içeren yaşam sonu aşaması hakkında yeterli veri bulunmadığından, YDE çalışmaları adımları çerçevesinde nadiren dikkate alınmaktadır [10]. Ayrıca, çeşitli çalışmalara göre, bir binanın inşası ve yıkılması için ihtiyaç duyulan enerji ihmal edilebilir

veya toplam yaşam döngüsü enerjisinin yaklaşık %1'ine konulabilir [11]. Dolayısıyla, bu araştırmada sistem sınırları, ürünün YDE ve YDCO<sub>2</sub> emisyon analizleri çerçevesinde kullanım aşamalarını içerir. Türkiye'de, bina ömrünün genel olarak 30-50 yıl arasında olduğu varsayılmaktadır, bu nedenle, bu çalışmada, iyileştirme sonrasında binanın geri kalan ömrü 30 yıl olarak kabul edilmektedir.

## 2.2. Örnek Yapının Özellikleri

Türkiye'de, her il idaresi tarafından ilköğretim binaları için tasarlanan ve T.C. Milli Eğitim Bakanlığı'ndan onaylı tipik projeler bulunmaktadır. Bu tipik projeler, çoğu bölgede aynı geometri ve özelliklere sahip olarak inşa edilmiştir [12].

Her tipik proje bazı yeni ve mevcut okul binalarını temsil ettiğinden, her biriyle ilgili çalışmalar ulusal enerji verimliliğini artırmak için hayati öneme sahiptir. İstanbul, Türkiye'nin ana ili olduğundan, bu çalışmada, İstanbul'un belirtilen yedi tipik projesinden biri örnek bina olarak seçilmiştir.



Şekil 1. DesignBuilder yazılımından türetilen örnek binasının aksonometrik görüntüleri

Türkiye'deki tüm eğitim binalarının üçte ikisi, 2000 yılında binalar için gerekli kod olan TS825 Türkiye Isı Yalıtım Standardından önce inşa edilmiştir. Bu binaları temsil etmek için, örnek binanın ısı yalıtımı olmadığı varsayılmıştır. Böylece, dış duvarın U-değeri, TS825 [13] Türk İzolasyon standardının gerekli U-değerini aşan  $1.85 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ 'dir.

Bina tuğla duvarlar ve betonarme bir yapıya sahiptir. Çatı, eğimli bir çatıdır. İç zeminler granit karolarla kaplanmıştır; Zemin kat kaplama malzemeleri seramiktir. Cam parçaları 6 mm kalınlıkta tekli şeffaf cam ve PVC çerçevelerden oluşur. Örnek binanın cam sisteminin U-Değeri ve Güneş Enerjisi Kazanç Katsayısı (SHGC) sırasıyla  $5.77 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  ve 0.81'dir. Tablo 1, yapı bileşenlerinin ve gömülü enerji (GE) ve gömülü karbon (GK) dahil olmak üzere malzemelerinin birincil özelliklerini göstermektedir.

Tablo 1. Örnek yapı bileşenlerinin temel özellikleri.

Bileşen	Malzeme katmanları (dışarıdan içeriye)	Isı iletkenlik ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )	Kalınlık (m)	Yoğunluk ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Alan ( $\text{m}^2$ )	GE ( $\text{kWh.kg}^{-1}$ )	GK ( $\text{kgCO}_2.\text{kg}^{-1}$ )	U-değeri ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
Dış duvar	Çimento	1.6	0.03	2000	3516.6	0.16	0.09	1.85
	Tuğla	0.72	0.19	1920		2.5	0.22	
	Alçı Sıva	0.51	0.025	1200		0.56	0.12	
Bodrum kat Dış duvar	Çimento	1.6	0.03	2000	1025.8	0.16	0.09	1.43
	Su yalıtımı	0.19	0.002	1100		21.6	1.92	
	Tuğla	0.72	0.3	1920		2.5	0.22	
Çatı	Alçı Sıva	0.51	0.025	1200	1573.1	0.56	0.12	3.43
	Çimento şapı	1.4	0.04	2000		0.44	0.18	
	Betonarme	2.5	0.15	2400		0.55	0.2	
Zemin kat	Beton	1.65	0.15	2200	1587.9	0.36	0.19	1.9
	Çimento şapı	1.4	0.04	2000		0.44	0.18	
	Seramik karolar	0.8	0.01	1700		0.79	0.46	
	Harç	0.88	0.03	2000		0.37	0.19	
	Granit	2.8	0.02	2600		0.99	0.39	
Cam	6mm tek cam	0.9	0.006	2500	596.8	4.42	0.96	5.77
	PVC çerçeve	0.17	0.06	1390	148	39.8	7.23	

Sınıflardaki ve diğer mekanlardaki minimum havalandırma oranları ASHRAE Standardı 62.1-2013'ten seçilmiştir. Gerçek projelerde mekanik havalandırma bulunmadığından, mola zamanlarında sınıfların pencerelerinden havalandırmanın yapıldığı varsayılmaktadır. Örnek bina için infiltrasyon oranı, tüm çevre bölgeler için 0,5 ACH olarak kabul edilir. Soğutma talebi, ilkbahar döneminde 27 Nisan - 15 Haziran arasında, sonbahar dönemi için de 15 Eylül - 1 Kasım arasında başlar. Sınıflarda herhangi bir aydınlatma kontrolü yoktur. Bir elektrikli cihaz tarafından salınan ısı miktarı ASHRAE 90.1-2007'den alınmıştır. TS825-2013'e göre, okullarda konfor aralığı sıcaklığına ulaşmak için, iç mekanların ısınma süresi için 20 °C, diğer kullanım süreleri için ise 24 °C sıcaklığa sahip olduğu varsayılmaktadır.

Isı jeneratörü, 0.8 COP'lik bir kazan ve soğutma jeneratörü, 1.5 COP'lik bir soğutucudur. Tablo 2, örnek binanın genel özelliklerini göstermektedir.

**Tablo 2.** Enerji sistemlerinin örnek binanın özellikleri.

Parametreler	
Doluluk süresi ve zamanlamaları	Hafta içi 08: 00-17: 00 Güz dönemi = 15 Eylül - 31 Ocak
Isıtma ayar noktaları	Bahar dönemi = 15 Şubat - 15 Haziran
Soğutma Ayar Noktaları	Mesai saatleri için 20 °C, mesai saatleri için 7 °C
Isıtma Sistemi Jeneratörü	Mesai saatleri için 24 °C, boş saatler için 32 °C
Soğutma Sistemi Jeneratörü	Sıcak su kazanı, verim = 0.8 COP (Performans Katsayısı)
Havalandırma sistemleri	1.5 COP'li Çiller (Performans Katsayısı)
Aydınlatma Takvimi ve Sistemi	Mola zamanlarında pencerelerden doğal havalandırma

### 2.3. Enerji Verimliliğini Artırmak için Mimari Önlemlerin Belirlenmesi

Binanın kullanım ömrü boyunca YDE ve YDCO<sub>2</sub>'yi hesaplamak için, simülasyon yazılımında modellenen bina üzerinde tek ve birleşik enerji verimliliği iyileştirme mimari önlemleri uygulanmaktadır. Bu önlemler bina kabuğunda kullanılan en yaygın önlemlerdir. Bunlar, ısı yalıtımı, cam sistemi yükseltmeleri ve Fotovoltaik (PV) sistemi kurulumunun eklenmesidir. Isı yalıtımı dış duvarlarda, çatı ve zemin katlarında uygulanır.

Türkiye'de beş farklı iklim bölgesi bulunmaktadır. TS825-2013'e göre, her iklim bölgesi bina kabuğu için farklı sınırlı U değerlerini gerektirir. İstanbul, dış duvarlar, tavan, zemin kat ve pencereler için sınırlı U-değerinin sırasıyla 0.57, 0.38, 0.57 ve 1.8 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> olduğu ikinci bölgede yer almaktadır. Isı yalıtımı uygulama alternatifleri üç farklı seviyede değerlendirilir. İlk seviye TS825-2013'in gerekli U-değerine dayanmaktadır. İkinci ve üçüncü seviyeler, sırasıyla TS825 gerekli U-değerlerinden yaklaşık %25 ve %50 daha iyidir. Cam sistemlerinin iyileştirmeleri de üç seviye boyunca uygulanmaktadır. İlk cam iyileştirme seviyesi, TS825-2013'e, 1.8 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> U-değerine ve 0.70 SHGC'ye dayanmaktadır. Bir çift cam sistemi, 1.5 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> U-değeri ve 0.56 SHGC ile ikinci seviye cam iyileştirme sağlar. Üçüncü seviye cam iyileştirme, üçlü bir Low-E camı içerir ve sırasıyla 1.1 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> ve 0.52 'ye eşit bir U-değerine ve bir SHGC'ye sahiptir. Çalışma çerçevesinde, eğimli çatıya 85 adet PV modül takılması da bir başka iyileştirme önlemdir. Bu PV sistem, monokristal (Mono-cSi) hücrelerden oluşmaktadır. PV sistem çatı alanının 68 m<sup>2</sup>'sini kaplar. Tablo 3, enerji verimliliğini artırmak için tek ve birleşik mimari önlemlerin alternatiflerini sunmaktadır.

**Tablo 3.** Enerji verimliliğini artırmak için önerilen alternatifler.

	Alt. Nu.	Açıklama	U-Duvar (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	U-Çatı (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	U-Döşeme (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	U-Cam (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	PV
Duvar	Al.1	Birinci seviyede dış duvar yalıtım uygulaması	-	-	-	-	-
	Al.2	İkinci seviyede dış duvar yalıtım uygulaması	0.45	-	-	-	-
	Al.3	Üçüncü seviyede dış duvar yalıtım uygulaması	0.3	-	-	-	-
Çatı	Al.4	Birinci seviyede Çatı kat yalıtım uygulaması	-	0.38	-	-	-
	Al.5	İkinci seviyede Çatı kat yalıtım uygulaması	-	0.3	-	-	-
	Al.6	Üçüncü seviyede Çatı kat yalıtım uygulaması	-	0.2	-	-	-
Zemin kat	Al.7	Birinci seviyede Zemin kat yalıtım uygulaması	-	-	0.57	-	-
	Al.8	İkinci seviyede Zemin kat yalıtım uygulaması	-	-	0.5	-	-
	Al.9	Üçüncü seviyede Zemin kat yalıtım uygulaması	-	-	0.4	-	-
Cam	Al.10	İlk seviye cam iyileştirme	-	-	-	1.8	-
	Al.11	İkinci seviye cam iyileştirme	-	-	-	1.5	-
	Al.12	Üçüncü seviye cam iyileştirme	-	-	-	1.1	-
Kombinasyonlar	Al.13	Al.1, Al.4 ve Al.7'nin kombinasyonu	0.57	0.38	0.57	-	-
	Al.14	Al.2, Al.5 ve Al.8'in kombinasyonu	0.45	0.3	0.5	-	-
	Al.15	Al.3, Al.6 ve Al.9'un kombinasyonu	0.3	0.2	0.4	-	-
	Al.16	Al.13 ve Al.10'un kombinasyonu	0.57	0.38	0.57	1.8	-
	Al.17	Al.14 ve Al.11'in kombinasyonu	0.45	0.3	0.5	1.5	-
	Al.18	Al.15 ve Al.12'nin kombinasyonu	0.3	0.2	0.4	1.1	-
	Al.19	Al.13 ve Al.10'un PV sistemi ile kombinasyonu	0.57	0.38	0.57	1.8	Var
	Al.20	Al.14 ve Al.11'in PV sistemi ile kombinasyonu	0.45	0.3	0.5	1.5	Var
	Al.21	Al.15 ve Al.12'nin PV sistemi ile kombinasyonu	0.3	0.2	0.4	1.1	Var

## 2.4. Yaşam döngüsü envanteri.

Bir yaşam döngüsü envanteri, YDD için veri toplama bölümüdür. Eğitim binaları için, YDE ve YDCO<sub>2</sub> stokları, ürüne ve kullanım evrelerine ilişkin enerji tüketiminin ve CO<sub>2</sub> emisyon miktarının belirlenmesini içerir. Her gelişim alternatifinin bu aşamalarında tüketilen enerjiyi belirlemek için, yapı bileşenleri için birim enerji başına gömülü enerji ve gömülü karbon değerleri GABI 6.0 YDD yazılımından [14] ve PV sistem bileşenleri için doğrudan literatürden elde edilmiştir [15].

Gömülü enerji ve gömülü karbondioksit katsayılarının belirlenmesi için süreç analizi yöntemi dikkate alınır. Hammadde çıkarma seviyesinden başlayarak, üretim sürecinde "Beşikten kapıya" yaklaşımı temel alınır. İyileştirme senaryolarına dahil edilen malzemelerin ömrü, metodolojide tarif edilen binanın ömründen daha fazla olduğu için, iyileştirme sonrası yenileme, binanın kullanım ömrü boyunca beklenmemektedir. Dolayısıyla, tekrarlayan gömülü enerji ve karbon dikkate alınmaz. Kullanım aşaması ile ilgili enerji tüketiminin hesaplanmasında birincil enerji tüketimi dikkate alınmaktadır. Türkiye'de tüketilen yakıt türleri için birincil enerji dönüşüm faktörleri, doğal gaz için 1,00 ve elektrik için 2,36 olarak verilmektedir [16]. Tüm alternatiflerin kullanım aşamasında HVAC sistemlerinin nihai enerji tüketimini hesaplamak için DesignBuilder ve EnergyPlus simülasyon araçları kullanılmıştır [17, 18]. Ayrıca, kullanım aşamasında CO<sub>2</sub> emisyonunun hesaplanması için, doğal gaz ve elektrik için emisyon faktörleri sırasıyla 0.234 ve 0.626 kg.eq.CO<sub>2</sub>.kWh<sup>-1</sup> olarak alınmıştır [19].

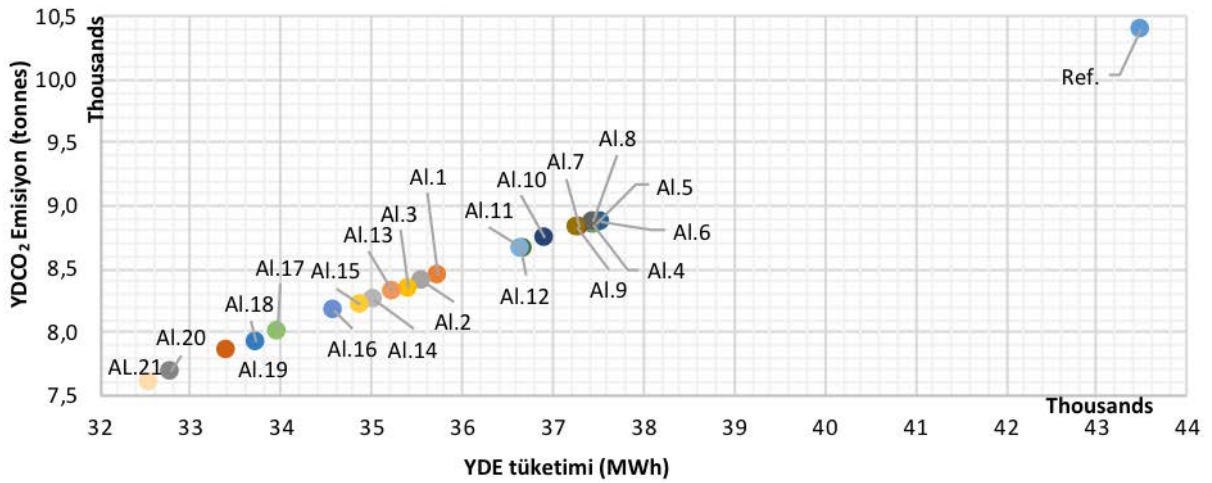
## 3. Simülasyon Sonuçları

Tüm yaşam döngüsü boyunca, mevcut durumda, bina 10.404,05 ton CO<sub>2</sub> emisyonundan ve 43.491,25 MWh birincil enerji tüketiminden sorumlu olacaktır. Sonuçlar, binada %27 civarında CO<sub>2</sub> emisyonu ve %31 birincil enerji tasarruf potansiyeli bulunduğunu göstermektedir. Tablo 4'te farklı alternatifler ve Örnek Bina'nın YDE ve YDCO<sub>2</sub> sonuçları gösterilmiştir.

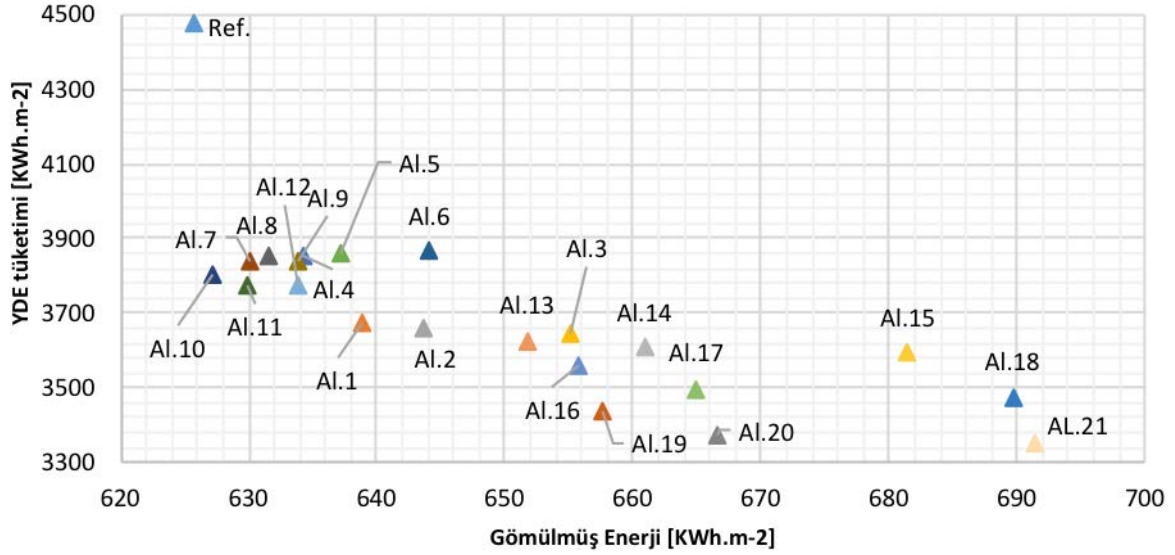
**Tablo 4.** Örnek Bina'nın incelemesi ve farklı alternatifler için YDE ve YDCO<sub>2</sub> analiz sonuçları.

Alternatif Numara.	Gömülü Enerji (MWh)	Gömülü Karbon (tonCO <sub>2</sub> )	Nihai Enerji Tüketimi (MWh.y <sup>-1</sup> )	Birincil Enerji (MWh.y <sup>-1</sup> )	Kullanım Karbonu (tonCO <sub>2</sub> .y <sup>-1</sup> )	YDE tüketimi (MWh)	YDCO <sub>2</sub> emisyon (tonCO <sub>2</sub> )
Ref.	6,078.04	867.12	766.34	1,247.11	317.90	43,491.25	10,404.05
Al.1	6,204.74	880.60	578.44	983.79	252.19	35,718.53	8,446.36
Al.2	6,252.26	885.65	570.89	976.74	250.57	35,554.49	8,402.71
Al.3	6,363.12	897.44	561.55	967.94	248.54	35,401.37	8,353.61
Al.4	6,161.57	876.01	638.16	1,043.05	266.03	37,453.08	8,857.00
Al.5	6,189.42	878.97	637.92	1,042.84	265.99	37,474.70	8,858.55
Al.6	6,256.24	886.07	637.63	1,042.58	265.93	37,533.55	8,863.83
Al.7	6,120.36	871.62	629.46	1,038.65	265.24	37,279.79	8,828.70
Al.8	6,133.73	873.04	629.78	1,043.46	266.61	37,437.51	8,871.21
Al.9	6,156.00	875.41	626.93	1,037.20	264.96	37,272.04	8,824.10
Al.10	6,091.23	869.99	626.36	1,027.73	262.26	36,923.12	8,737.71
Al.11	6,117.61	875.72	619.88	1,018.13	259.84	36,661.39	8,670.93
Al.12	6,157.18	884.31	618.69	1,015.94	259.28	36,635.43	8,662.58
Al.13	6,330.60	893.98	552.30	963.11	247.65	35,224.03	8,323.47
Al.14	6,419.32	903.42	541.94	953.71	245.50	35,030.61	8,268.43
Al.15	6,619.29	924.69	529.47	942.19	242.86	34,885.05	8,210.40
Al.16	6,370.17	902.58	531.97	940.34	242.19	34,580.31	8,168.19
Al.17	6,458.89	912.01	511.81	916.98	236.55	33,968.17	8,008.42
Al.18	6,698.42	941.87	496.10	901.13	232.83	33,732.37	7,926.83
Al.19	6,386.63	903.22	514.97	900.22	231.55	33,393.17	7,849.57
Al.20	6,475.35	912.66	494.81	876.86	225.90	32,781.03	7,689.80
Al.21	6,714.89	942.52	479.10	861.01	222.19	32,545.23	7,608.21

Al.3 alternatifi dış duvarların ısı yalıtımı seçeneklerini karşılaştırarak, YDE ve YDCO<sub>2</sub> emisyonu için optimum performans sağlar. YDE tüketimi ve YDCO<sub>2</sub> emisyonlarında, sırasıyla %18,6 ve %19,7 azalma ile sonuçlanır. Opak sistemlere uygulanan tüm senaryolar arasında dış duvar yalıtımı, en düşük YDE ve YDCO<sub>2</sub> ile sonuçlanmıştır. Cam sistemi iyileştirme senaryoları arasında karşılaştırma yapıldığında, Al.12'nin en uygun durum olduğu anlaşılmaktadır. Bu alternatif, 1.1 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> U-değeri ve 0.52 SHGC içeren üçlü düşük emisyonlu camı içermektedir. Opak bileşenlerin ve cam sistemlerinin iyileştirmelerinin kombinasyonları arasında uygun alternatifler, en düşük YDCO<sub>2</sub> emisyonlarını ve YDE'yi sağlayan Al.15 ve Al.18'dir. PV sisteminin çatıya montajı ve üçüncü seviye bütün opak ve cam sistemleri iyileştirmesi, Al.21, en düşük YDE ve YDCO<sub>2</sub> emisyonları nedeniyle diğer tüm alternatifler arasında en iyi performansı ortaya koymaktadır. Bu alternatif, %25,2 oranında YDE ve %27 oranında YDCO<sub>2</sub> emisyon tasarrufu sağlamaktadır. Bu nedenle, en uygun iyileştirme alternatiftir. Güçlendirme seçeneklerinin YDE tüketimlerinin YDCO<sub>2</sub> emisyonları ile dağılımı şekil 2'de gösterilmiştir.

**Şekil 2.** YDE tüketimlerinin YDCO<sub>2</sub> emisyonları ile dağılımı.

Şekil 3, örnek incelemesi oluşturma ve sonradan iyileştirme seçenekleri için YDE'ye karşılık düzenlenmiş enerjiyi göstermektedir. Daha fazla gömülü enerjili seçenekler, yaşam döngüsü boyunca minimum enerji tüketimine neden olur. Al.21 iyileştirme senaryoları arasında en yüksek gömülü enerjiye ve en düşük YDE tüketimine sahiptir. Bu seçenek, TS825 için gerekli miktardan %50 daha iyi bir U-değeri ile toplam opak geliştirmelerini, cam sistemi iyileştirmelerini ve PV kurulumunu içerir. Şaşırtıcı olmayan bir şekilde, Al.21 alternatifi, yalnızca en düşük gömülü enerjiye değil, tüm alternatifler arasında en yüksek YDE tüketimine sahiptir.



Şekil 3. YDE, farklı iyileştirme senaryoları ile Birleşik Enerji'ye karşı.

#### 4. Sonuç

Çalışmanın temel amacı, mimari enerji verimliliği iyileştirme senaryolarını uygulayarak eğitim binasının yaşam döngüsü boyunca enerji tüketimini ve CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmaktır. Aslında, eğitim binaları her ülkede bina stokunun önemli bir bölümünü kapsamaktadır. Önerilen prosedürü uygulayarak, enerji tasarrufunun faydalarını artırmak ve aynı zamanda topluma ve çevreye etkiyecek CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmak mümkündür. Çalışma boyunca, var olan yaşam döngüsü enerji verimliliğini arttırmaya yönelik farklı mimari önlemler mevcut ilköğretim okullarından birine uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. YDE ve YDCO<sub>2</sub> analizlerinin sonuçları, fotovoltaik sistem kurulumuyla birlikte tüm opak ve cam sistemlerindeki iyileştirmeler dahil alternatiflerin, toplam enerji miktarındaki artışa rağmen, en fazla enerji tasarrufu ve en düşük CO<sub>2</sub> emisyonuna sahip olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, daha yüksek miktarda gömülü enerjiye sahip olan alternatifler, YDE tüketiminde ve YDCO<sub>2</sub> emisyonunda daha fazla azalma sağlamıştır. Ayrıca, uygun ısı yalıtımı gibi enerji verimliliği stratejileri uygulayarak, sırasıyla YDE ve YDCO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %25 ve %27 azaltma potansiyelini sağlamak mümkündür.

Enerji ve CO<sub>2</sub> emisyonu tasarruf potansiyelini belirlemek için kullanılan geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, bu çalışmada kullanılan yöntem binanın tüm yaşam döngüsünü ele alarak bütünsel bir yaklaşım kullandığı için daha doğrudur. Enerji tasarrufu ve sağlıklı çevre gibi doğrudan, istihdam ve ekonomik büyüme gibi dolaylı avantajlara kadar büyük faydalar elde edebilmek için toplumların diğer türde yapılarındaki YDE ve YDCO<sub>2</sub> emisyonlarını önemli ölçüde azaltmak için benzer bir yaklaşım geliştirilmelidir. Hesaplamaların yapılma şekli belirsizlikten bağımsız değildir, çünkü hesaplamalarda uygulanacak oldukça kesin olmayan veriler ve girdilerin belirlenmesinde çok sayıda girdi verisi vardır. Bu tür verilerin kaynakları, doğru bir tahminde bulunmak için çok önemlidir ve ülkeden ülkeye farklılık gösterebilir ve hatta materyal üreticisinin fabrikasına bağlıdır. Bu nedenle, Türkiye dahil olmak üzere tüm ülkelerdeki çeşitli malzemelerin gömülü enerjisini daha güvenilir sonuçlara sahip olarak tanımlamak için kapsamlı bir çalışma yapılması önem taşımaktadır.



## KAYNAKLAR

- [1] L.P. Lombard, J. Ortiz , Ch. Pout, A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings* 40 (2008) 394–398.
- [2] L. F.Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, A. Castell, Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (YDEA) of buildings and the building sector: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014) 394–416
- [3] T. Ramesh, R. Prakash, K.K. Shukla, Life-cycle energy analysis of buildings: an overview. *Energy and Buildings*, 10 (2010) 1592–1600.
- [4] G. K. C. Ding, Life cycle energy assessment of Australian secondary schools, *Building research & information*, 35 (2007) 487–500
- [5] S. D. Mangan, G. Koçlar Oral, Assessment of residential building performances for the different climate zones of Turkey in terms of life cycle energy and cost efficiency, *Energy and Buildings*, 110 (2016) 362–376
- [6] A. Dasgupta, M. Roberts, P. Cropper, Barriers to achieving Energy and Carbon reductions in New-Built and Refurbished schools in England, 7th International Conference on Energy Efficiency in Commercial Buildings IEECB'12, Frankfurt, Germany, 2013, pp. 6-18.
- [7] National Education Statistics-Formal Education-2013/2014, (2014), National Education Strategy Development Presidency.
- [8] ISO 14040. Environmental management life cycle assessment principles and framework. Geneva: International Standards Organization; 2006.
- [9] BS EN 15643-2, Sustainability of Construction Works-Assessment of Buildings - Part 2: Framework for the Assessment of Environmental Performance, British Standards Institution, London, UK, 2012.
- [10] M. Wallhagen, M. Glaumann, T. Malmqvist, Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change case study on an office building in Sweden. *Building and Environment* 46 (2011) 1863-71.
- [11] I. Sartori, A.G. Hestnes, Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: a review article. *Energy and Buildings* 39 (2007) 249-57.
- [12] C. Köse, O. Barkul, A Study on the Problems of the Implementation of Project Type Primary Structures, *MEGARON*, 7 (2012) 94-102. (In Turkish)
- [13] Turkish Standards Institution, TS 825: Buildings' thermal insulation requirements. Ankara 2013.
- [14] GABI Software. GABI 6.0 User Manual. Germany: PE International; 2013.
- [15] Al. C. Diaz, Energy Life Cycle Assessment (LCA) of silicon-based photovoltaic technologies and the influence of where it is manufactured and installed, Master thesis of renewable energy and energy sustainability, University of Barcelona, 2013- 2014
- [16] Turkish Ministry of Public Works and Settlement, Building's Energy Performance of Turkey (Bep-Tr), *Official Gazette*, 27075 (2008).
- [17] <https://www.designbuilder.co.uk/>
- [18] <https://energyplus.net/>
- [19] Turkish Green Building Council (CEDBIK), Green Building Certification Guide for New Houses (2013).

## ÖZGEÇMİŞ

### Nazanin MOAZZEN

1985 yılı Tebriz/İran doğumludur. 2006 yılında Tebriz İ.Azad Üniversitesi Sanat ve Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'nde bitirmiştir. 2006-2012 yıllar arasında mimar olarak mimari-mühendislik danışmanlık şirketlerinde çalışmıştır. 2014'te Politecnico di Torino'da, Technology Energy Building Environment (TEBE) araştırma ofisinde çalışmalarını sürdürmüştür. 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisansını çevre kontrolü ve yapı teknolojisi bölümünde bitirmiş olup ve 2016 İTÜ'de "Yapı Bilimleri" doktora programında tez aşamasında olarak devam etmektedir. 2015'den başlayan Çevre ve Şehircilik Bakanlığının İTÜ ile birlikte yürüttüğü "Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun Kapsamında Ekolojik Yerleşme Birimi Standardı Geliştirilmesi ve



Eskişehir İli Odunpazarı İlçesi Kocakır Mevkisinde Pilot Uygulama Yapılmasına İlişkin Ortak Hizmet Uygulaması Protokolü” projesinde yer almıştır. 2016-2017 da Kadirhas üniversitesinde ders başı ücretli öğretim görevlisi ve 2017 yılından beri Maltepe üniversitesinde Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümünde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.

### **Mustafa Erkan KARAGÜLER**

1977 yılında İstanbul Teknik Üniversitesinde İnşaat mühendisliği bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 1979 yılında Yüksek Mühendis ve 1988 yılında Doktor ünvanını almıştır.

1979-1988 yılları arasında İTÜ Mimarlık Fakültesi Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır. 1988-1990 yıllarında Doktora Sonrası Araştırmacı olarak ACBM Center, Northwestern üniversitesi, ABD’de görev yapmıştır. 1990 yılında Yrd. Doç. Dr. ünvanını almış ve İTÜ Mimarlık Fakültesinde görev yapmıştır. Aynı üniversitede 1992 yılından beri Doç. Dr. Olarak Mimarlık Fakültesi, Yapı Malzemeleri Anabilim Dalında görev yapmaktadır. Araştırma alanları olarak Sismik Değerlendirme ve Mevcut Yapıların Güçlendirilmesi, Çimento Esaslı Malzemeler, Geleneksel Yapı Malzemeleri, Tahribatsız Muayene Yöntemleri, Bina Hasarları ve Bina Restorasyonu, Binaların enerji performansı ve Sürdürülebilir yapı malzemeleri konularında çalışmaktadır.

### **Touraj ASHRAFİAN**

Dr. Touraj Ashrafian Yüksek lisans eğitimini 2006 yılında, Tebriz I.Azad Üniversitesi Sanat ve Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü’nde bitirmiştir. Doktora eğitimini ise 2016 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Bilimleri Programı’nda “Türkiye’deki Konut Binalarının Enerji Etkin İyileştirmesi İçin Ekonomik Olarak Uygulanabilir Çözümlerin Belirlenmesinde Yeni Bir Yaklaşım” adlı çalışma ile Prof.Dr. A. Zerrin Yılmaz danışmanlığı altında tamamlamıştır. Araştırma ve çalışma alanları, yaklaşık sıfır enerji bina (nZEB), optimum maliyet analizleri, iç çevre kalitesi (IEQ), binalarda enerji verimliliği ve mevcut binaların enerji etkin iyileştirmesi olarak tanımlanabilir. 2002-2011 yıllar arasında baş mimar ve baş araştırmacı olarak iki farklı mimari-mühendislik danışmanlık şirketlerinde çalışmış ve bu müddette 200’ü aşkın projede yer almıştır. 2011-2016 yıllar arasında üç farklı araştırma projesinde ve çeşitli LEED ve BREEAM projelerinde yer almıştır. 2016 yılından beri Özyeğin Üniversitesinde Doktor Öğretim Görevlisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

### **Özge AKTÜRK**

1999’da İstanbul doğumludur. 2017 yılında Kartal Anadolu Lisesi Almanca Sayısal bölümünden mezun olduktan sonra 2017-2018 eğitim döneminde Maltepe Üniversitesi Mimarlık bölümüne girmiş ve halen devam etmektedir. Mimari tasarım, yenilenebilir enerji sistemleri üzerine çeşitli workshop ve programlarda yer almıştır.