



# ENERJİ PERFORMANS SİMÜLASYONUNUN DOĞRULAMA SÜRECİ: OKUL BİNASI ÖRNEĞİ

*Validation Process Of Energy Performance Simulation: School Building Example*

Gökçe Tomrukçu  
Gizem Avgan  
Hazal Kızıldağ  
Ayşe Özlem Dal  
Neşe Ganiç Sağlam  
Ece Kalaycıoğlu Özdemir  
Touraj Ashrafian

## ÖZET

Binalar, dünyadaki karbon emisyonlarının üçte birini üretmektedir. Eğer gerekli önlemler alınmazsa bu oranın 2040 yılına kadar %40 oranında artacağı tahmin edilmektedir. Binaların enerji performansı özellikle gelişmekte olan ülkeler için kritik konuların başında gelmektedir. Türkiye’de binalardaki enerji tüketiminin dikkate değer bir bölümü eğitim yapıları kaynaklıdır. Bu nedenle karbon emisyonlarının ve enerji tüketimlerinin sınırlandırılmasında binaların enerji performanslarına yönelik araştırmalar büyük önem taşımaktadır. Bina enerji simülasyonları, bina tasarımcılarına, yapı bilimcilerine ve karar vericilere, binaların performansını tanımlamak için çok sayıda senaryoyu test etme imkânı sunar. Ancak, pratik bir çalışmanın doğru sonuçları verabilmesi için simülasyon sonuçları ile gerçek enerji tüketimi arasındaki fark en aza indirilmelidir. Bu çalışma, seçilen tipik mevcut bir okul binasının bina enerji performans simülasyon modelinin oluşturulup geliştirilmesi ve enerji tüketimlerinin faturalar ve iç sıcaklık ölçümleri ile doğrulanması aşamalarını içermektedir. Bina geometrisi DesignBuilder (DB) programında modellenmiştir ve enerji modeli, bina kabuğu malzemeleri, mekanik sistemler, aydınlatma sistemi ve elektrikli ekipmanların kapasite ve verimlilik değerlerinin programa girdisi ile tamamlanmıştır. Oluşturulan enerji modelinin doğrulama aşamasında elde edilen doğal gaz ve elektrik faturaları, EnergyPlus (EP) yazılımından elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Çalışmanın son aşamasında, iç mahal sıcaklık ölçümleri ile simülasyon sonuçları arasındaki fark CV(RMSE) and MBE metotları ile doğrulanmıştır. Sonuç olarak, araştırmanın binaların enerji performanslarının iyileştirilmesi sürecinde temel oluşturması hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Eğitim Binaları, Bina Enerji Modellemesi, Enerji Modeli Doğrulama, Enerji Performans

## ABSTRACT

Buildings produce one-third of the world's carbon emissions. If necessary, measures are not taken, it is estimated that this rate will increase significantly by 40% by 2040. The energy performance of buildings is one of the critical issues especially for developing countries. A significant portion of energy consumption in Turkey is consumed by educational buildings. For this reason, research on the energy performance of buildings is of great importance in limiting carbon emissions and energy consumption. Building energy simulations offer building scientists and decision makers the opportunity to test various scenarios to identify the pros and cons of buildings. However, for a practical study to give accurate results, the difference between simulation results and actual energy consumption should be minimized. This study includes the creation and development of the building energy performance simulation model of a selected typical existing school building and the verification of energy consumption with invoices and indoor temperature measurements. The building geometry is modeled in the DesignBuilder (DB) program with the input of the building envelope materials, mechanical systems, lighting system and electrical equipment. The obtained natural gas and electricity bills during

the validation phase of the created energy model were compared with the simulation results obtained from the EnergyPlus (EP) software. In the last stage of the study, the difference between indoor temperature measurements and simulation results was confirmed by the CV(RMSE) and MBE methods. As a result, it is aimed that the research will form the basis for the improvement of the energy performance of buildings.

**Key Words:** Educational Buildings, Building Energy Modeling, Energy Model Validation, Energy performance

## 1.GİRİŞ

İnşaat sektöründe gün geçtikçe artan bina stoğu, enerji tüketimini ve karbon salınımını arttırarak küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi sorunlara neden olmaktadır. Bu sorunları önlemek, var olan bina stoğunun enerji tüketimini azaltmak için dünya çapında enerji verimli eylemlere, uygulamalara ve uygun politikalara acil ihtiyaç vardır [1],[2]. Binalar, karbon emisyonlarının %70'ine ve küresel enerji tüketiminin %40'ına neden olmaktadır [3]. Uluslararası Enerji Ajansına (2016) göre, bina enerji tüketiminin dünya çapında 2012'den 2040'a kadar yılda ortalama %1,5 artması beklenmektedir [4]. Bu nedenle, bina enerji performansının iyileştirilmesine önem verilmekte ve buna yönelik adımlar atılmaktadır. Bina Enerji Performansı Direktifi 2002 yılında yayınlanmıştır ve esas olarak farklı ülkeler için enerji performansı hesaplama gereksinimleri ile ilgilidir [5]. Avrupa Birliği Binaların Enerji Performansı Direktifi tarafından 2010 ve 2018 yıllarında güncellenen raporlar, halihazırdaki bina stoğunda iyileştirme önlemlerinin uygulaması ile sıfır enerji binaları hedeflemiştir [6], [7].

Avrupa'daki bina stoğu içinde, taban alanı açısından en büyük ikinci kategori %25 ile konut dışı binalardır [8]. Konut dışı bina stokunun bir parçası olan eğitim binaları, enerji verimliliğini sağlamak ve geleceğin dünya vatandaşlarını sürdürülebilir kalkınmaya teşvik etmek adına benzersiz bir potansiyele sahiptir.

Mevcut binaların performansının değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi, özellikle okul binaları için bina stokunun olumsuz etkilerini azaltmak ve enerji tasarrufu hedeflerine ulaşmak için kritik bir konuma sahiptir. Performans değerlendirmesi yapmak ve güçlendirme stratejilerini geliştirmek için bina enerji simülasyon modelleri, çok sayıda senaryonun değerlendirilmesini ve optimum senaryonun belirlenmesini sağladığı için maliyet ve zaman verimliliği açısından en iyi yöntemlerden biridir [9], [10].

Bina enerji simülasyonu (BES), binanın enerji performansını ve termal konforunu kapsamlı bir şekilde hesaplayan fiziksel tabanlı bir matematiksel model olarak tanımlanabilir [11], [12]. BES modelleri, enerji tasarruflarının ve bina güçlendirme stratejilerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için gereklidir [13]. Bina enerji simülasyonu sonuçları ve gerçek değerler arasında kullanıcıya bağlı olarak değişkenlik gösteren diğer deyişle, belirsiz parametrelere bağlı farklılıklar olabilir. Bu nedenle enerji simülasyonu doğrulamasında kalibrasyon güvenilir bir model oluşturmak için gerekli bir adımdır [14]. Bina modeli kalibrasyonu, simülasyon girdilerinden etkilenen bir model doğruluğu ölçüsüdür [15]. Başlıca kalibrasyon yaklaşımları; manuel ve otomatik olarak sınıflandırılabilir ve kalibrasyon yaklaşımlarının %74'ü maneldir [16]. Manuel kalibrasyon yöntemi, ASHRAE Kılavuzu [17] ve uluslararası performans ölçümü ve doğrulama protokolü (IPMVP) [18] tarafından desteklenmektedir.

Doğrulama çalışması genellikle sıcaklık ve bina enerji tüketimi için yapılmaktadır [15,19,20,21]. Manuel kalibrasyonda kullanılan bazı yöntemleri; RMSE (root mean square error), CV(RMSE) (coefficient of variation of the root mean square error), MBE (mean bias error), NMBE (normalized mean bias error), GOF (goodness of fit) ve R2 (regression) yöntemleridir. Bu yöntemler, iç hava sıcaklığının ve elektrik, doğalgaz gibi bina enerji tüketimlerinin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması için uygundur.

Literatürde, enerji modeli doğrulamada manuel kalibrasyonu kullanan çalışmalar, kalibrasyon için alınması gereken girdileri ve bina kabuğuna ilişkin gerekli ölçümleri sunmakla birlikte, gerçek ve öngörülen (simülasyon) verileri için hata hesaplama yöntemlerini ve ilgili standartları sunar [20], [22],

[23]. Türkiye'de ilgili literatürde okul binalarında enerji modeli kalibrasyonuna odaklanan az sayıda çalışma bulunmaktadır. Aksin & Arslan (2021), bir okul projesinin enerji performansını ve optimizasyonunu değerlendirmiştir [24].

Bu çalışma temel olarak Türkiye'de bulunan bir tip eğitim binasının enerji modeli kalibrasyonuna odaklanmaktadır. Çalışma metodunda literatürde sıklıkla kullanılan CV(RMSE) ve MBE yöntemleri kullanılmıştır.

## 2. YÖNTEM

Enerji modellerinin doğrulanması çalışmasında, İstanbul Bakırköy ilçesinde yer alan 10025-720 kodlu tip okul binası pilot okul olarak seçilmiştir. Enerji modeli kalibrasyonu için elde edilen veriler DesignBuilder ve EnergyPlus programına tanımlanarak enerji modeli oluşturulmuştur. Projenin yöntemi, ölçüm ve istatistiksel yöntemlerle toplanan gerçek verilerle manuel kalibrasyonu kapsamaktadır ve aşağıdaki dört aşamadan oluşmaktadır.

*Adım 1. Veri toplama:* Bu adım, verilerin elde edilmesini ve ölçülmesini içerir. Binaya ait mimari çizimler, malzeme bilgileri ve enerji tüketim faturaları idari yetkililerden temin edilmiştir. Mekanik sistem detayları, aydınlatma ve elektrikli ekipman bilgileri, kullanıcıya ilişkin parametreler yapılan ziyaretler ile elde edilmiştir. Örnek çalışma binasına en yakın meteoroloji istasyonlarına ait iklim verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Veri doğruluğunu artırmak için, okul binasında dış duvarların ısı geçirme katsayısı (U-değeri) ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, iç sıcaklık verilerinin simülasyon modeli ile karşılaştırılması ve kalibrasyonu için okulda yer alan standart derslik mahalinde bir aylık dönemi kapsayacak şekilde saatlik olarak iç ortam kalitesi ölçümü yapılmıştır.

*Adım 2. Enerji Modellerinin Oluşturulması:* Bina geometrisi DesignBuilder programında oluşturulmuştur. Yapı malzeme bilgileri, mekanik sistem detayları, aydınlatma ve ekipman güç değerleri programa tanımlanmıştır.

*Adım 3. Simülasyon süreci:* Kullanıcıya bağlı aktivite, ekipman ve aydınlatma kullanımı, mekanik sistem çalışma takvimleri gözlem ve kullanıcılar ile yapılan görüşmeler sonucunda hazırlanarak programa tanımlanmıştır.

*Adım 4. Enerji Modellerinin Kalibrasyonu:* Oluşturulan enerji modelinin EnergyPlus programı ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları, elde edilen tüketim faturaları ve iç mekân sıcaklık ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Kalibrasyon sürecinde, simülasyon sonuçları ile ölçüm ve fatura verileri arasındaki hata oranı ASHRAE 14 Kılavuzu'nda önerilen yöntemle göre hesaplanmış, buna göre MBE ve CV(RMSE) denklemleri kullanılmıştır.

$$(1) \quad MBE = \frac{\sum_{i=1}^{Np} (Mi - Si)}{\sum_{i=1}^{Np} Mi}$$

$$(2) \quad CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{Np} ((Mi - Si)^2 / Np)}}{Mp}$$

### 2.1 Pilot Yerleşke/Bina

Araştırma kapsamında İstanbul ilinde pilot okul belirlenmiştir. Seçilen okul Bakırköy ilçesinde bulunan tek binadan oluşan bir eğitim kurumudur. Bina 4 normal kat ve bodrum kattan oluşan 5 katlı bir yapıdan oluşmaktadır. Yaklaşık 4435,78 m<sup>2</sup> brüt alana sahiptir. Binanın inşaatı 2008 yılında tamamlanarak kullanıma açılmıştır. Okulda gözlemler sırasında toplanan veriler doğrultusunda 20 öğrenci kapasiteli toplam 31 standart derslik, çok amaçlı salon, bilgisayar laboratuvarı, spor salonu,

küçük yemekhane ve kütüphane bulunmaktadır. Binanın materyallerine ilişkin özellikler mimari çizimlerden, ölçüm sonuçlarından ve TS 825 standartlarından elde edilmiştir. Binanın opak bileşenlerine ait detaylar Tablo 1’de sunulmuştur.

**Tablo 1:** Pilot Okul Binası Opak Bileşenlerine Ait Özellikler

Opak Bileşenler	Materyal	Kalınlık	İletkenlik	U Değeri
		m	W/mK	W/m <sup>2</sup> -K
Dış Duvar	Çimento sıvası	0,03	0,7	1,42
	Beton	0,4	0,89	
	Çimento sıvası	0,03	0,7	
Döşeme (Toprak ile Temas eden)	Tavan sıvası	0,02	0,14	1.88
	Betonarme	0,15	1,6	
	Zemin tesviye şapı	0,05	0,7	
	Seramik karo	0,01	0,8	
Çatı	Kiremit	0,01	0,84	0,41
	EPDM	0,018	0,03	
	OSB	0,018	0,3	
	Hava Boşluğu	0,5	-	
	Taş Yünü	0,08	0,045	
	Betonarme	0,15	0,89	
	Sıva	0,02	0,7	

Pilot okula ait saydam bileşenlerin özellikleri ise yapılan gözlemler sonucunda elde edilen bilgilere göre belirlenmiştir. Gün ışığı geçirgenlik oranının düşük olmasında cam filmlerinin etkisi olmuştur. Detaylar Tablo 2’de sunulmuştur.

**Tablo 2:** Pilot Okul Binası Saydam Bileşenlere Ait Özellikler

Saydam Bileşen	U değeri	Güneş Enerjisi Geçirgenlik Katsayısı	Gün Işığı Geçirgenlik (%)
Cam	1.3	0.55	0.3

## 2.2 Veri Toplama ve Ölçümler

Enerji modelinin hazırlanması için mekanların fonksiyonları, kullanıcı sayıları ve kullanım sıklıkları, binada kullanılan yapı malzemeleri, iç mekanlarda bulunan aydınlatma sistemleri ve elektrikli cihazlar, mevcut mekanik sistem türü, kullanım detayları, kapasite ve verim değerleri verileri okuldan yetkililer aracılığıyla temin edilmiştir. Binaya ait opak ve saydam bileşenler okula yapılan gözlemler ve mimari proje yardımıyla elde edilmiştir. İlgili okulun mekanik sistemlerine ait veriler teknik personelden alınan bilgiler ve saha çalışmaları sonucunda toplanmıştır. Bodrum katta bulunan kazan dairesinde, doğalgaz ile çalışan sıcak su kazanı bulunmakta ve bina, bu kazana bağlı radyatörler ile ısıtılmaktadır. Mekanik sistem ekipmanlarının kapasite ve verim değerleri, üzerlerinde bulunan etiket bilgilerinden elde edilmiştir. Binada merkezi sıhhi su ısıtma sistemi bulunmamaktadır, fakat bodrum katta bulunan yemekhanede ve görevli dairesinde, zemin katta bulunan anasınıfı mutfağında ve birinci katta bulunan mutfakta bulunan dört adet termosifon ile sadece bu mahallerde sıhhi sıcak su ihtiyacı karşılanmaktadır. Kullanıcıya bağlı parametreler örneğin doğal havalandırma için mahalın kullanıcı sayısı, doluluk saatleri, pencere açma kapama alışkanlıkları gibi veriler anket ve saha gözlemleri ile elde edilmiştir.

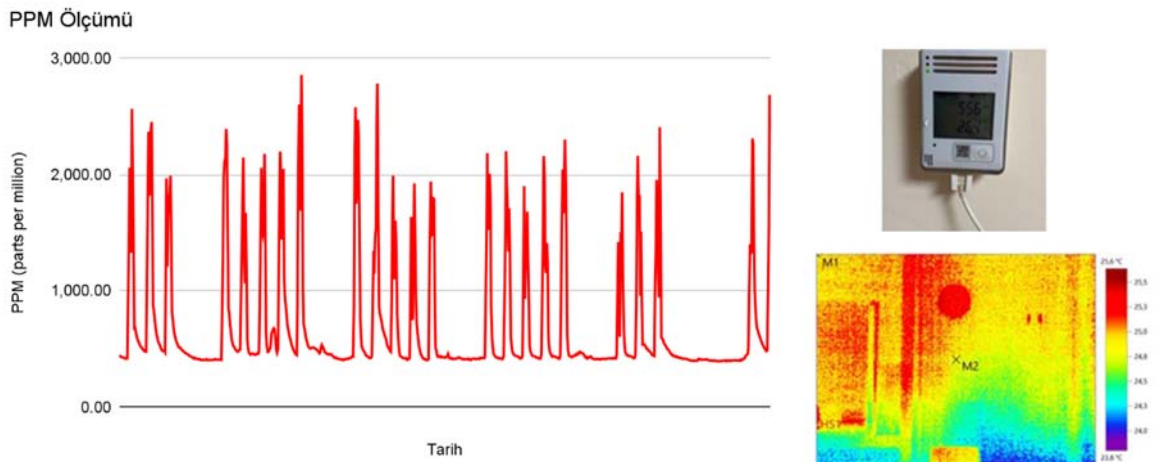
Bina Enerji Simülasyonu (BES) için, enerji modelinin doğrulanması oldukça önem taşımaktadır. Denetim ve yerinde ölçümler, daha kesin ve güvenilir sonuçlar elde etmek için doğrulama sürecini desteklemelidir. Modellerin doğruluğunu artırmak için aşağıdaki parametrelerin analizleri doğrulama sürecini desteklemiştir;

- İç ortam kalitesi ölçümleri
- Dış duvarların U değeri ölçümleri
- Bina kabuğunun termal analizi

### İç Ortam Kalitesi Ölçümleri

İç ortam kalitesi (sıcaklık, bağıl nem ve CO<sub>2</sub> seviyeleri) Datalogger cihazları ile ölçümlenmiştir. Ölçüm yapılacak olan mahaller belirlenirken yön, konum ve güvenliğe ilişkin parametreler göz önüne alınmıştır. Cihazın doğrudan güneşe maruz kalman bir iç duvar olacak şekilde konumlandırılmasına dikkat edilmiştir. Bu yüzden mahalın iç duvarları termal kamera ile görüntülenerek ısı köprüleri analiz edilmiş ve buna göre ölçüm cihazı için optimum konum belirlenmiştir (Şekil 1).

İç hava kalitesi ölçümlerinde ısıtma sistemi aktif durumdadır ve ortalama CO<sub>2</sub> seviyesi 710 ppm olarak ölçümlenmiştir (Şekil 1). Özellikle ders saatlerinde CO<sub>2</sub> seviyesinin oranının arttığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık teneffüs ve öğle arası saatlerinde azalış gözlemlenmiştir. Bu ölçümden yola çıkılarak teneffüslerde ve öğle arasında mekanların havalandırılması için pencere ve kapıların açıldığı sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca kullanım takvimlerinin oluşturulmasında da bu ölçüm sonucu dikkate alınmıştır.



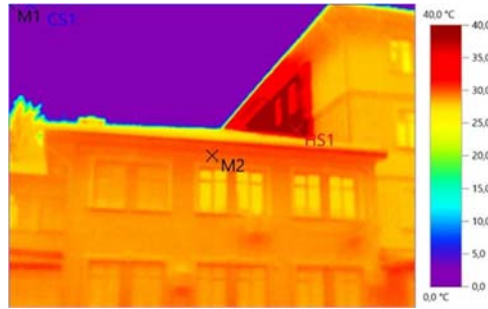
**Şekil 1.** Datalogger cihazından elde edilen haftalık CO<sub>2</sub> (ppm) seviyeleri ve iç duvar termal kamera analizi

### Dış duvarların U değeri ölçümleri

Yapı malzemelerinin ısı özellikleri ve bina cephesinin ısı geçirgenliği binaların performansını büyük ölçüde etkiler. Bu yüzden doğrulama sürecini etkileyen önemli bir parametre olarak kabul edilir. Bina kabuğu zamanla dış koşullardan etkilendiğinden yapıldığı zamana göre değişiklik gösterebilir. Bu yüzden bu çalışmada bina kabuğu yerinde ölçümlenmiştir. Sonuçlara göre dış duvarların ısı geçirgenliği  $1.473 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların TS 825 standartlarına göre İstanbul ili için önerilen değerden ( $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) yüksek olduğu tespit edilmiştir.

### Bina kabuğunun termal analizi

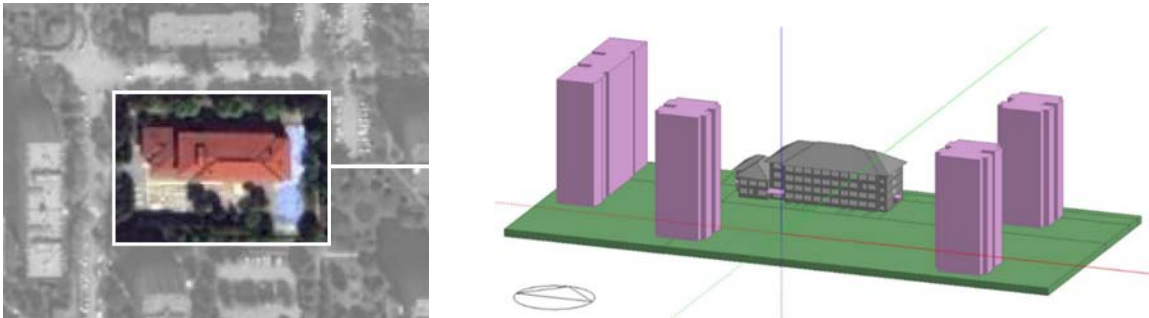
Doğrulama sonucuna etki edebilecek diğer önemli parametre bina kabuğunun mevcut durumudur. Bina kabuğundaki ısı kaçaklarının doğru şekilde analiz edilebilmesi için iç mekandaki hava sıcaklığının dış mekândan daha sıcak olduğu kış aylarında ölçüm yapılmıştır. Ayrıca, termal kamera analizlerinden yola çıkılarak U değeri ölçümünün, duvarın ısı köprüsü bulunmayan bölümünde yapılması sağlanmıştır. Şekil 2'de termal kamera ölçüm analiz sonuçlarından örnek verilmiştir.



Şekil 2. Termal kamera ölçüm analizi örneği

### 2.3 Enerji Modeli ve Simülasyon

Metodolojinin ilk adımından elde edilen veriler, BES modellemesi için girdi olarak alınmıştır. Bina geometrisi DesignBuilder'da mimari projeye uygun ölçülerde modellenmiştir (Şekil 3). Gölge etkisini dahil etmek amacı ile çevre binalar programa eklenmiştir. Güncel meteorolojik veriler, simülasyon sonuçlarının doğru tahmin edilmesi için toplanmıştır. Pilot binanın bulunduğu konum için tipik meteorolojik yıl (TMY) verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır [25]. BES'in ilk adımında, ısı zonları belirlenmiştir. Benzer işleve, kullanıma ve termofiziksel özelliklere sahip mekanlar tek bir ısı zon olarak modellenmiştir. Bina modellemelerinin malzeme girdileri, okul idaresinden elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiştir. Dış duvarların U değerleri yerinde ölçülmüştür. Bina kabuğu malzemelerinin özgül ısı kapasitesi, yoğunluk ve iletkenlik değerleri TS 825 standartlarından ölçümleri doğrulayacak şekilde seçilmiştir. Bina ve aydınlatma sistemlerine ait ısıtma, soğutma, havalandırma sistemleri (HVAC), ekipmanları ve elektrik bilgileri EnergyPlus aracında tanımlanmıştır. Seçili okulda soğutma ihtiyacını klimalar karşılamaktadır. Kazanlara bağlı radyatörler ile ısıtma ihtiyacı karşılanmaktadır. Bir sonraki adım olarak, kullanıcı davranışları ve ekipmanların kullanım takvimleri oluşturulup EnergyPlus'ta ilgili mahallere tanımlanmıştır.



Şekil 3. Pilot Bina Vaziyet Görünümü ve Enerji Modeli

## 2.4 Kalibrasyon

Kalibrasyon aşamasında ASHRAE yönergesi takip edilmiştir. Bu yönergeye göre kalibrasyon sürecinde beş ana aşama vardır; bina bilgilerinin toplanması, bina enerji simülasyonu, simüle edilmiş ve ölçülen verilerin birbiriyle karşılaştırılması ve kabul edilebilir bir hata aralığına ulaşmak için belirsiz simülasyon parametrelerinin değiştirilmesi [26]. Aylık enerji tüketimlerinin kalibrasyonunda ASHRAE standardına göre MBE aralığı  $\pm\%5$  olabilir ve CV(RMSE) değeri  $\%15$ 'in altında olmalıdır. Saatlik sıcaklık doğrulama işlemi için MBE oranı  $\pm\%10$  hata aralığında ve CV(RMSE) değeri maksimum  $\%30$  olmalıdır.

Doğrulama süreci, verilerin toplanmasıyla başlayıp; referans bina verilerinin, yıllık meteorolojik verilerin yanı sıra yerinde ölçülen verilerin elde edilmesi ile devam etmiştir. İlk simülasyonların ardından BES modeli düzenlemeleri ile kalibrasyon süreci başlar. İlk kalibrasyon adımı, iç ortam sıcaklıklarının saatlik olarak doğrulanmasını içerir. Simülasyon sonuçları, ölçülen verilerle karşılaştırılmıştır. İkinci kalibrasyon adımı olarak, simülasyon ile hesaplanan bina enerji tüketim sonuçları, enerji faturaları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hesaplanan MBE ve CV(RMSE) hata oranlarının kabul edilebilir aralıkta olmadığı durumda, BES modelindeki belirsiz parametreler Tablo 4'te belirtilen değer aralığında test edilerek gerçek tüketimlere ve en az hata oranına sahip model oluşturulmaya çalışılmıştır. Belirsiz parametreler için test edilen değer aralıkları ve kalibrasyon sonucunda belirlenen değerler tabloda belirtilmiştir (Tablo 4).

**Tablo 4:** Belirsiz Simülasyon Parametrelerine İlişkin Kabuller ve Kalibre Edilmiş Değerler

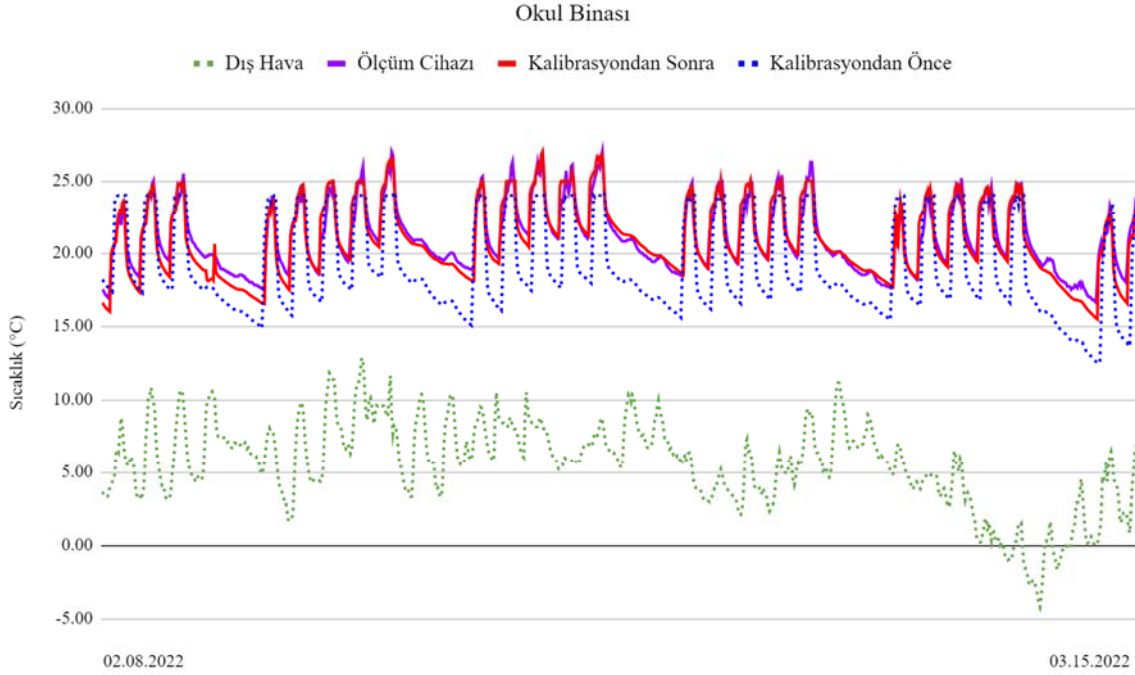
Belirsiz Parametreler	Birim	Değer Aralığı	Kalibre edilen Değer	
Kazan Verimliliği	%	85 - 95	87	
Hava Sızdırmazlığı	saatte hava değişimi(ach)	0.1 - 0.5	0.2	
Isı ayar Noktası	°C	23-25	25	
Doğal Havalandırma	1/h	Kış Ayları: 4-8 Yaz Ayları: 2-6	Ders	Ara
		Ocak / Şubat / Mart / Kasım / Aralık	1-2	2-4
		Nisan / Mayıs / Eylül / Ekim	2-4	4-6
		Haziran/Temmuz/Ağustos	4-6	6-8

## 3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Enerji modellerinin simülasyonlar yoluyla doğrulanması temelde geniş bir belirsizlik aralığına sahiptir [27,28]. Bu nedenle BES modelinin standartlara göre kabul edilebilir aralıkta hata payına ulaşmak için belirsiz kullanıcıya bağlı parametreler yinelemeli olarak revize edilerek nihai modele ulaşılmıştır. Elde

edilen sonuçlar, doğrulama için gerçekleştirilen testler ve araştırma ekibinin değerlendirmeleri aşağıdaki gibidir:

Enerji modeli doğrulamasının ilk aşamasında iç sıcaklık ölçümlerinin doğrulanması için, ölçümlere ve standartlara dayandırılan BES model dosyası oluşturulmuştur. İç sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre en yüksek sıcaklık değeri 27 °C olarak, en düşük sıcaklık ise 16.6 °C olarak hesaplanmıştır. Ölçüm yapılan tarih aralığında ortalama sıcaklık 21.8 °C olarak elde edilmiştir. Kalibrasyon öncesi elde edilen simülasyon sonuçlarına göre ise en yüksek sıcaklık 24.5°C, en düşük sıcaklık 12.5°C ve ortalama sıcaklık ise 19.7 °C olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre simülasyon hesaplamalarının ölçüm değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu yüzden kullanıcıya bağlı parametreler ve ölçümlenemeyen ancak ulusal ve uluslararası standartlarca belirli değer aralığı belirlenmiş parametreler için yapılan kabuller revize edilmiştir. Örneğin okul binasında yapılan gözlemler sırasında, kullanıcıların doğal havalandırma sağlamaya yönelik pencere açma davranışlarının değişkenlik gösterdiği analiz edilmiştir. Ölçümle elde edilen CO2 verileri de analiz edilerek havalandırma takvimi güncellenmiştir. Belirsiz kullanıcıya bağlı parametrelerin revizyon işlemleri sonucunda hesaplamalar tekrar edilmiş, elde edilen simülasyon sonuçları doğrulanabilmiştir. Ortalama sıcaklık 15.4 °C, en yüksek sıcaklık 27 °C ve en düşük sıcaklık ise 15.4 °C olarak hesaplanmıştır. Kalibrasyon işlemi sonucunda nihai enerji modelinin hata payı CV(RMSE) yöntemine göre %0.7, MBE yöntemine göre %2.6 olarak hesaplanarak önerilen hata payının içerisinde kalmıştır (Şekil 4).

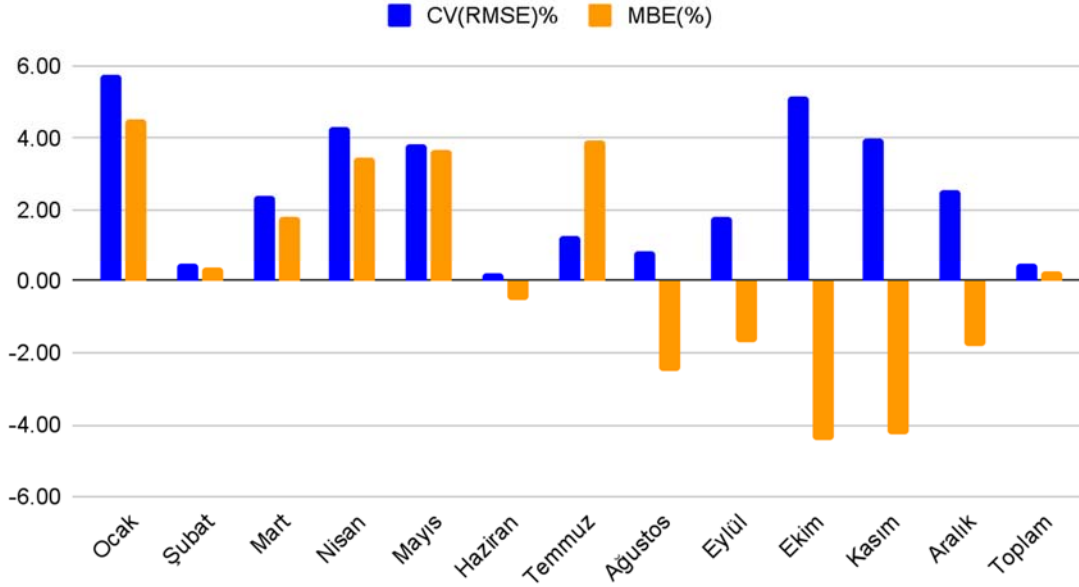


Şekil 4. İç hava sıcaklığı ölçüm sonuçları ve kalibrasyonu

İç sıcaklık kalibrasyon aşamasından sonra okulun enerji tüketimine ilişkin simülasyon/hesaplama sonuçları ile enerji faturalarını karşılaştırma aşamasına geçilmiştir. İç sıcaklık doğrulama aşamasında kullanılan CV(RMSE) ve MBE yöntemleri elektrik ve doğalgaz tüketimleri için uygulanmıştır. Elektrik tüketimi için simülasyon sonuçları ve faturalardaki tüketim arasındaki farkın fazla olduğu Ocak ayı dikkat çekmiştir. Bu farkın ara tatilde öngörülemez kullanım faktörlerine bağlı olduğu değerlendirilmektedir. Bu ayda CV(RMSE) %5,7 ve MBE %4,5 olarak hesaplanmıştır. Okulların açık olduğu dönemlerde elde edilen farklılıkların ise özellikle konferans salonları, yemekhane ve toplantı salonları gibi belirli bir kullanım takvimi olmayan mahallerden kaynaklandığı görülmektedir. Yaz aylarındaki farkın ise okulu kullanan idari personellerin klima kullanımlarından kaynaklandığı söylenebilir. Eylül- Aralık aylarında ise faturalardaki tüketim değerlerinin genel olarak simülasyon sonuçlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun elektrikli termosifonların ve ekipmanların kullanımlarına bağlı olabileceği tahmin edilmektedir. Ancak bütün aylarda elde edilen değerlerin standartlarca önerilen hata payı limitleri içinde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5) .



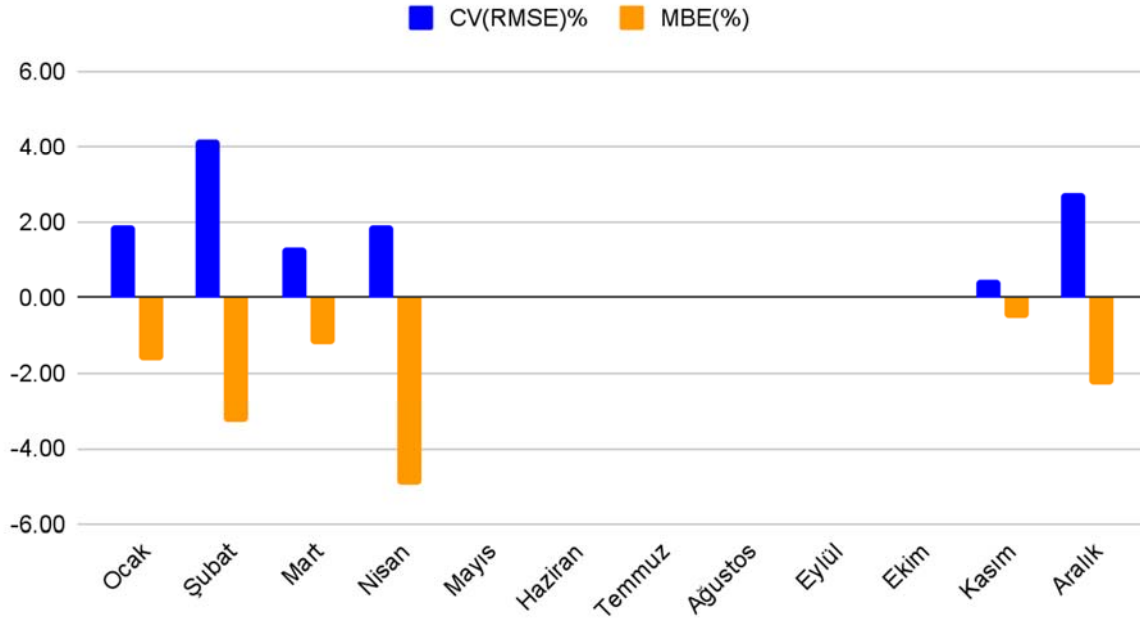
## Elektrik Tüketimi



**Şekil 5.** Yıllık elektrik tüketim doğrulaması

Doğalgaz tüketiminin analizinde ısıtma sisteminin kapalı olduğu Mayıs-Ekim aralığı doğrulama sürecine dahil edilmemiştir. Elektrik tüketimine benzer şekilde, doğalgaz tüketiminde de Ocak ayında simülasyon ile faturalar arasında yüksek fark olduğu gözlemlenmiştir. Bu ayda CV(RMSE) %1,9 ve MBE -%1,6 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde bu farkın ara tatilde öngörülemezden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Diğer aylar analiz edildiğinde ortaya çıkan farkın doğal havalandırma kullanım takvimlerinden oluşabileceği öngörülmektedir. Doğal havalandırma takvimleri okula yapılan gözlemler ve ilgili standartlardan yola çıkılarak belirlenmiştir. Ancak kullanıcıya bağlı olarak değişim gösterdiği için, simülasyonlarda gerekli olan (tekrar eden) standart bir kullanım takvimi belirlemek gerçek durumu temsil etmemektedir. Bu yüzden ortaya çıkan fark kabul edilebilir düzeydedir. Önemli farkın gözlemlendiği diğer ay ise Nisan ayıdır. Bu ayda dış sıcaklıkların yüksek olması ısıtma sisteminin kullanıcı konforu açısından bazı günler çalıştırılmamış olabileceğine işaret etmektedir. Aralık ayında ise simülasyon sonuçlarındaki tüketimlerin faturadakinden yüksek çıkmasının, kış ayı olması sebebiyle pencerelerin daha az açılmasından kaynaklandığı öngörülmektedir. Ancak bütün aylar dikkate alındığında, CV(RMSE) ve MBE hata oranlarının kabul edilebilir aralıkta olduğu görülmektedir (Şekil 6).

## Doğalgaz Tüketimi



Şekil 6. Yıllık doğalgaz tüketim doğrulaması

Mevcut bir binanın enerji modeli simülasyonu aracılığıyla temsil edilmesi, genellikle kullanıcıya bağlı faktörler ve ekipman yıpranmaları nedeniyle çeşitli zorluklara ve kısıtlamalara sahiptir. Bu çalışmada, simülasyon sonuçlarını etkileyen ana değişkenler belirlenmiş ve bunların tüketim oranları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Öncelikle, doğalgaz tüketimini önemli ölçüde etkileyen kritik bir değişken olan kazan verimlilik değeri için kullanım süresi ve bakım durumu göz önüne alınarak yüzdelerle bir aralık belirlenmiştir. Enerji modeli kalibrasyonu üzerindeki etkisini analiz etmek için belirlenen aralık içerisinde kalan değerler ile simülasyonlar alınmıştır. Buna göre, kazan verimindeki  $\pm 0,10$ 'luk değişimin binanın doğalgaz enerji tüketiminde %12 ile %14 arasında farka neden olabileceği ortaya çıkmıştır.

Enerji modeli kalibrasyonu sürecinde önem arz eden bir diğer faktör, ayar sıcaklığıdır. Pilot eğitim binasında termostat sisteminin olmaması, uygun ayar sıcaklığının tanımlanmasında kısıtlamalara sebep olmuştur. İç hava sıcaklık ölçüm sonuçları incelenerek ayar sıcaklığı için değer aralığı belirlenmiş, her bir değer için simülasyon modeli oluşturulmuş ve sonuçları analiz edilmiştir. Bu doğrultuda ayar sıcaklığındaki  $\pm 1$  C değişim doğalgaz tüketiminin %12-15 oranında etkilenmesine neden olmuştur.

Binaların termofiziksel davranışları, doğal havalandırma ve hava sızıntısı değerlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bina enerji simülasyonlarında hava akışı parametresi, potansiyel hata oranını artıran nedenlerden biridir [29,30]. Bu nedenle, hava değişim miktarının (1/h) belirlenmesi, kalibrasyon aşamasında kritik öneme sahiptir. Çalışma kapsamında pilot okula gerçekleştirilen ziyaretler esnasında gözlemler ve anketler yapılmış, özellikle teneffüs saatlerinde camların daha fazla açılması sebebi ile hava değişiminin fazla olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, ders ve teneffüs saatleri dikkate alınarak her mahal için ayrı doğal havalandırma takvimleri oluşturulmuştur. Ek olarak, kış aylarında yaz aylarına göre daha düşük değerler tanımlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre doğal havalandırma oranındaki %0.1 (1/h) fark, doğalgaz tüketimine %0.9 ile %1.3 oranında etki etmektedir.

Ek olarak, termal kütle bir binanın ısı iletimini önemli ölçüde etkiler [31]. Bununla birlikte, birçok modelleme aracı yalnızca dış duvarların, iç bölmelerin ve mobilyaların termal kütlelerinin etkilerini

dikkate alır [32]. Bu çalışmada, doğru sonuçlara ulaşmak için iç duvarların yüzey alanları ölçülmüş ve simülasyon modeline tanımlanmıştır.

Enerji modeli kalibrasyon sürecinde tartışılan parametrelerin optimizasyonundan sonra, iç ortam sıcaklığı ve enerji tüketimi kalibrasyonu için simülasyon sonuçlarının MBE ve CV(RMSE) hata oranları aşağıdaki maksimum değerlerle sonuçlanmıştır:

- Saatlik iç sıcaklık ölçümleri ile simülasyon çıktıları arasındaki MBE hata oranı 2.6%, CV(RMSE) hata payı 0.7% olarak ölçülmüştür.
- Yıllık elektrik tüketiminin MBE hata oranı 4.50% ve CV (RMSE) hata payı 5.73% olarak kaydedilmiştir. Yıllık doğalgaz tüketiminde bu değerler sırası ile -4.95% ve 4.22% olarak belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇ (Conclusion)

Enerji performans simülasyonunun doğrulama sürecinde verilerin simülasyon programlarına aktarılması ve gerçeğe en yakın sonuçların elde edilmesi en kritik adım olarak kabul edilir. Çalışma kapsamında doğrulama için İstanbul'da bulunan mevcut eğitim binası seçilmiş, yerinde gözlemler ve ölçümler yapılmıştır. Kullanıcıya bağlı parametreler için ilgili standartlara başvurulmuştur. Saatlik iç sıcaklık ölçümleri ile simülasyon aracılığıyla hesaplanan iç sıcaklık değerleri CV(RMSE) ve MBE yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ölçümlere göre ortalama iç sıcaklık 21.6°C olarak analiz edilmiştir. Simülasyon modelinde ortalama sıcaklık değeri revizyon öncesi 19,5°C, revizyon sonrası 21,3°C olarak hesaplanmıştır. Bu aşamada farkın en fazla olduğu aralıklar incelenmiş ve kullanıcıya bağlı parametreler dikkate alınarak değişiklikler yapılmıştır. Bir sonraki adım olarak faturalarda yer alan aylık elektrik ve doğalgaz tüketimleri ile simülasyon sonucunda hesaplanan tüketim değerleri karşılaştırılmış, CV(RMSE) ve MBE yöntemleri ile hata oranları hesaplanmıştır. Elektrik tüketimi optimizasyonu için kullanıcı aktivitesine bağlı olarak elektrikli ekipman ve aydınlatma çizelgelerinde revizyonlar yapılmıştır. Doğalgaz tüketiminin kalibrasyonu için doğal havalandırmaya ilişkin kabuller, belirlenen aralıktaki değerler test edilerek revize edilmiştir.

Sonuç olarak araştırma, pilot çalışma ile enerji performans simülasyonu doğrulama adımları sunmaktadır. Doğrulama aşamasında karşılaşılan zorluklar arasında hava sızıntısı değerinin oda sızdırmazlık testi ile ölçülememesi ve ilgili standartlar araştırılarak belirlenen aralıktaki değerlerin test edilmesi doğrulama aşamasında karşılaşılan güçlükler arasındadır. Ek olarak, iç sıcaklık doğrulama aşamasında, binada yer alan mobilyaların termal kütle olarak tanımlanmasının, tüketim ve iç sıcaklıklar ile ilgili daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Fatura değerlerinin doğrulanması için iç hava sıcaklığı kalibrasyonu sırasındaki bu belirsiz parametrelerin değişimleri dikkate alınmalıdır. Bu çalışmanın, bina enerji simülasyonu sonuçlarının doğrulanmasına yeni bir yaklaşım sunarak daha sonraki çalışmalara rehberlik etmesi beklenmektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Mata, É., Wanemark, J., Nik, V. M., & Sasic Kalagasidis, A. (2019). Economic feasibility of building retrofitting mitigation potentials: Climate change uncertainties for Swedish cities. *Applied Energy*, 242, 1022–1035. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.042>
- [2] Hodgson, Hugo, Miles Keeping, Katharine Marsden, David Pearce, and David Shiers. 2017. "Energy." In *Sustainable Built Environments*, 69–82. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- [3] "Energy Outlook 2023." 2022. Economist Intelligence Unit. Ekim 19, 2022. <https://www.eiu.com/n/campaigns/energy-in-2023/>
- [4] International Energy Agency. 2016. *World Energy Outlook 2016*. Paris Cedex, France: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). <https://doi.org/10.1787/weo-2016-en>.

- [5] Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings. Off J Eur Union. 2003; 1:65-71.
- [6] Directive 2010/31/Eu of the European Parliament and of the Council. (2010). Europa.Eu.
- [7] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/ 27/ EU on energy efficiency. Off J Eur Union. 2018: 75-91.
- [8] Europe's buildings under the microscope. (2011). BPIE - Buildings Performance Institute Europe. <http://www.bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope/>
- [9] Al-Shargabi, A. A., Almhafdy, A., Ibrahim, D. M., Alghieth, M., & Chiclana, F. (2022). Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics: Research trends, taxonomy, and performance measures. *Journal of Building Engineering*, (Vol.54, Issue 104577). <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104577>.
- [10] Tian, Z., Zhang, X., Jin, X., Zhou, X., Si, B., & Shi, X. (2018). Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. *Energy and Buildings*, (Vol.158, pp. 1306-1316). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.022>
- [11] Building Energy Modeling. (n.d.). Energy.gov. Retrieved January 17, 2023, from <https://www.energy.gov/eere/buildings/building-energy-modeling>
- [12] Chong, A., Gu, Y., & Jia, H. (2021). Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*, (Vol. 253, Issue 111533). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533>
- [13] Clarke, J.A., Strachan, P.A., Pernot C. (1993). An approach to the calibration of building energy simulation models *ASHRAE Trans*, (Vol.99, pp. 917).
- [14] Hou, D., Hassan, I. G., & Wang, L. (2021). Review on building energy model calibration by Bayesian inference. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (Vol.143, Issue 110930). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110930>
- [15] Raftery, P., Keane, M., & O'Donnell, J. (2011). Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. In *Energy and Buildings* (Vol. 43, Issue 9, pp. 2356–2364). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.020>
- [16] Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 37, pp. 123–141). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- [17] ASHRAE Guideline 14, Measurement of Energy and Demand Savings. ASHRAE Standards Committee (2002)
- [18] International performance measurement and verification protocol (IPMVP).(2002) (Vol. 1).
- [19] Chong, A., Gu, Y., & Jia, H. (2021). Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*, (Vol. 253, Issue 111533). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533>
- [20] Royapoor, M., & Roskilly, T. (2015). Building model calibration using energy and environmental data. In *Energy and Buildings* (Vol. 94, pp. 109–120). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.050>
- [21] Chai, T. and Draxler, R. R.: Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geosci. Model Dev.*, 7, 1247–1250, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>, 2014. (<https://gmd.copernicus.org/articles/7/1247/2014/gmd-7-1247-2014.pdf>)
- [22] Pachano, J. E., & Bandera, C. F. (2021). Multi-step building energy model calibration process based on measured data. In *Energy and Buildings* (Vol. 252, p. 111380). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111380>
- [23] Gutiérrez González, V., Ramos Ruiz, G., & Fernández Bandera, C. (2020). Empirical and Comparative Validation for a Building Energy Model Calibration Methodology. In *Sensors* (Vol. 20, Issue 17, p. 5003). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s20175003>
- [24] Aksin, F. N., & Arslan Selçuk, S. (2021). Energy Performance Optimization of School Buildings in Different Climates of Turkey. In *Future Cities and Environment* (Vol. 7, Issue 1). Ubiquity Press, Ltd. <https://doi.org/10.5334/fce.107>
- [25] MGM. (n.d.). Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Retrieved January 26, 2023, from Gov.tr website: <https://mgm.gov.tr/>
- [26] ASHRAE Guideline 14, Measurement of Energy and Demand Savings. ASHRAE Standards Committee (2002)

- [27]Z. O'Neill, et al., Calibration of a building energy model considering parametric uncertainty, ASHRAE Trans. 118 (2012) 189–196.
- [28]T. Reddy, Literature review on calibration of building energy simulation programs: uses, problems, procedures, uncertainty and tools, ASHRAE Trans. 112(2006) 226–240.
- [29]Gutiérrez González, V., Ramos Ruiz, G., & Fernández Bandera, C. (2020). Empirical and Comparative Validation for a Building Energy Model Calibration Methodology. In Sensors (Vol. 20, Issue 17, p. 5003). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s20175003>
- [30]Cipriano, J., Mor, G., Chemisana, D., Pérez, D., Gamboa, G., & Cipriano, X. (2015). Evaluation of a multi-stage guided search approach for the calibration of building energy simulation models. In Energy and Buildings (Vol. 87, pp. 370–385). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.052>
- [31]Verbeke, S.; Audenaert, A. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, 82, 2300–2318.
- [32]Lee, S.H.; Hong, T. Validation of an inverse model of zone air heat balance. Build. Environ. 2019, 161, 106232

## TEŞEKKÜR

Bu araştırma, TÜBİTAK 3501 Kariyer Geliştirme Programı tarafından düzenlenen “Türkiye’deki Mevcut Eğitim Yerleşkelerinin İyileştirilmesinde Yaklaşık Sıfır Enerji Hedefine Yönelik Uzun Dönem Stratejiler için Ulusal Yaklaşımın Geliştirilmesi” isimli ve 219M552 numaralı araştırma projesinin bir parçasıdır.

## ÖZGEÇMİŞ

### Gökçe TOMRUKÇU

1996 yılı Samsun doğumludur. Lisans derecesini 2020 yılında Özyeğin Üniversitesi Mimarlık bölümünden onur öğrencisi olarak almıştır. Ardından Özyeğin Üniversitesi Mimarlık bölümünde tam burslu olarak yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Fiziksel Çevre Kontrolü lisans derslerinde öğretim asistanı olarak görev almıştır. Yüksek lisans çalışmalarının yanı sıra, Özyeğin Üniversitesi Yapı Malzemeleri ve Fizik Laboratuvarı'nın devam eden ulusal katılımcı araştırma projelerinde araştırma öğrencisi olarak yer almıştır. Araştırma ilgi alanları, iklim değişikliğinin bina enerji performansı üzerindeki etkileri, binalarda enerji verimliliği ve neredeyse/net-sıfır enerjili binalar konularını kapsamaktadır.

### Gizem AVGAN

1997 yılı Muğla doğumludur. Özyeğin Üniversitesi Mimarlık bölümünden 2020 yılında onur öğrencisi olarak mezun olmuştur. Yüksek lisans eğitimine Özyeğin Üniversitesi Mimarlık bölümünde tam burslu olarak başlamıştır. Fiziksel Çevre Kontrolü lisans derslerinde öğretim asistanı olarak görev aldıktan sonra, Özyeğin Üniversitesi Yapı Malzemeleri ve Fizik Laboratuvarı'nın devam eden ulusal araştırma projesinde araştırma öğrencisi olarak yer almaya başlamıştır. Yüksek lisans çalışmalarında biyoiklimsel tasarım parametrelerinin bina ve yerleşkelerin enerji performansı üzerindeki etkileri, binalarda enerji verimliliği ve neredeyse/net-sıfır enerjili binalar konuları üzerine odaklanmaktadır.

### Hazal KIZILDAĞ

1995 yılı İstanbul doğumludur. Özyeğin Üniversitesi Mimarlık bölümünden 2019 yılında mezun olmuştur. Yüksek lisans eğitimine Özyeğin Üniversitesi Mimarlık bölümünde tam burslu olarak başlamıştır. Özyeğin Üniversitesi Yapı Malzemeleri ve Fizik Laboratuvarı'nın ulusal araştırma



projesinde araştırma öğrencisi olarak çalışmaya başlamıştır. Yüksek lisans çalışmalarında binalarda enerji verimliliği, biyomimetik mimari ve adaptif cephe tasarımları konuları üzerine odaklanmaktadır.

### **Ayşe Özlem DAL**

1996 yılı İstanbul doğumludur. 2019 yılında yüksek onur derecesiyle Özyeğin Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım (İngilizce) bölümünden mezun olmuştur. Yüksek lisans derecesini aynı üniversitenin Mimarlık (Tezli) programında tamamlamaktadır. 2022 yılından itibaren Özyeğin Üniversitesi Mimarlık bölümü, Yapı Teknolojileri alanında araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları kentlerde enerji verimliliği, parametrik tasarım ve analiz ve kentlerde afet riskine karşı dayanıklılığın artırılması üzerinedir.

### **Neşe Ganiç SAĞLAM**

2010 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü'nü, aynı üniversitede 2012 yılında Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Yüksek Lisans Programını ve 2017 yılında Yapı Bilimleri Doktora Programını tamamlamıştır. 2011-2017 yılları arasında İTÜ Mimarlık Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2018 yılından bu yana Özyeğin Üniversitesi Mimarlık Bölümü'nde Dr. Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır.

### **Ece Kalaycıoğlu ÖZDEMİR**

2007 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı üniversitede 2007 yılında yüksek lisans çalışmalarına başlamış ve bu süreçte 2008 -2009 yılları arasında Politecnico di Torino Üniversitesi'nde Bina Performans Direktifleri ve enerji sertifikasyon sistemleri üzerine tez araştırması yapmıştır. 2010 yılında Yüksek Mimar unvanı almıştır. Son olarak, 2017 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Doktor derecesini tamamlamıştır. 2009-2016 yılları arasında EKOMİM Ekolojik Mimarlık Hizmetleri adlı firmada çalışmıştır. 2017 yılından bu yana Özyeğin Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma konuları arasında, bina enerji performansı, aydınlatma ve güneş ışığı performansı modelleme ve simülasyonları, enerji etkin ve sürdürülebilir mimari tasarım geliştirme, kullanıcı ısı ve görsel konfor analizleri, sıfır/yaklaşık sıfır enerji/karbon bina tasarımı, yenilenebilir enerji sistemleri ve bölgesel enerji sistemleri yer almaktadır.

### **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 tamamlamıştır. 2016-2022 yılları arasında Özyeğin Üniversitesi'nde Dr. Öğretim Üyesi olarak görev yapmıştır. Halihazırda Northumbria Üniversitesi'nde Mimari ve Yapılı Çevre Bölümünde görev yapmaktadır. Araştırma ve çalışma alanları, yaklaşık sıfır enerji binalar (nZEB), optimum maliyet analizleri, iç çevre kalitesi (IEQ), binalarda enerji verimliliği, mevcut binaların enerji etkin ve adım adım iyileştirmesi, bu tür iyileştirmelerde EPBD-recast çerçevesinde düşük maliyet gerektiren önlemlerin alınması, bu önlemler için gerekli maliyet analizlerinin yapılması, pozitif enerjili kentler ve iklim adaptasyonu olarak tanımlanabilir.