



BİNA ENERJİ PERFORMANS ANALİZİ; SİMÜLASYON, DOĞRULAMA VE KALİBRASYON YÖNTEMLERİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Building Energy Performance Analysis; A Research on Simulation, Validation, and Calibration Methods

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

ÖZET

Dünyadaki karbon salımının artması geleceğimizi tehdit eden başlıca unsurlardan biridir. Kentler, dünyadaki sera gazı emisyonunun %66'sından ve enerji tüketiminin %78'inden sorumludur. Bina sektörü ise dünyadaki karbon-dioksit emisyonunun %70'i ve enerji tüketiminin %40'undan sorumludur. Bu nedenle, bina enerji performansının iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar, ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan kritik bir konumdadır. Dünya çapında enerji verimliliğinin hem kent hem de bina ölçeğinde artırılması için gerekli faaliyetler, politikalar ve araştırmalar sürdürülmektedir. Bina enerji performans simülasyonu, kentlerin ve binaların enerji akışlarını analiz etmeyi sağlar. Doğrulama ve kalibrasyon yöntemlerini simülasyon sürecine entegre etmek, simülasyon tahminlerini gerçek sonuçlarla eşleştirerek modelin güvenilirliğini belirlemek için esas oluşturmaktadır. Bu yüzden hem mevcut bina stoğunda hem de tasarım aşamasında olan binaların performans analizlerinin yapılması son derece kritiktir.

Bu çalışma, bina performans analizine bağlı olan bina enerji simülasyonu, simülasyonun doğrulanması ve kalibrasyon yöntemleri ile ilgili bir araştırma yapmayı amaçlamıştır. Çalışmada, bina enerji simülasyonu hem kent hem de bina ölçeğinde değerlendirilmiştir; farklı simülasyon programları derlenmiştir, simülasyon doğrulama aşamasının kritik parametreleri ve çeşitli kalibrasyon yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca, gelecekte konu ile alakalı yürütülecek özgün çalışmalara destek olması amacıyla, literatürdeki eksik konular vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bina Enerji Performansı, Bina Enerji Simülasyonu, Simülasyonun Doğrulaması, Kalibrasyon Yöntemleri.

ABSTRACT

Worldwide increasing energy consumption is one of the threats to the future of our planet. Urban areas are responsible for 66% of the greenhouse gas emission and 78% of the energy consumption in the world. The building sector accounts for 70% of carbon dioxide emissions and 40% of energy consumption. Hence, studies about improving the energy performance of buildings are in a critical position from economic, social, and environmental perspectives. Studies are carried out globally to enhance actions, policies, and energy efficiency at different scales. Building energy performance simulation provides an analysis of energy flows of the districts and buildings. Integrating the validation and calibration process is essential to determine the model's credibility, matching the simulation predictions with the actual results. Therefore, performing the performance analysis for the existing building stock and buildings at the design stage is critical. The study aimed to conduct in-depth

research on building energy simulation, validation process, and calibration methods associated with building performance analysis.

In the study, the building energy simulation is evaluated both at the district and building scale; different simulation engines are investigated; critical parameters of simulation validation and various calibration methods are reviewed. Moreover, the knowledge gaps in literature have been highlighted to strengthen the uniqueness of future studies.

Key Words: Building Energy Performance; Building Energy Simulation, Validation of the Simulation, Calibration Methods.

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, karbon emisyonunun yükselmesi ve küresel sıcaklığın artması dünyayı tehdit eden çevre problemleridir [1, 2, 3]. Kentler, sera gazı emisyonunun %66'sından ve enerji tüketiminin %78'inden sorumlu iken [4, 5]; binalar, karbondioksit emisyonunun %70'inden ve enerji tüketiminin %40'undan sorumludur [1]. Bina stoğunun çevre üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için dünya çapında geliştirilen eylem planlarına, araştırmalara ve politikalara ihtiyaç vardır [4]. Bu aksiyonlara, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak amacıyla 2015 yılında düzenlenen Uluslararası Paris Anlaşması [6], enerji verimliliği ve bina enerji performansını konu alan 2002 [7] yılında yayımlanıp 2010 [8], 2015 [9], ve 2018 [10] yıllarında revizyonu yapılan Enerji Performans Bina Direktifi örnek olarak gösterilebilir.

Mevcut ve yeni binaların performans değerlendirilmesi ve iyileştirme çalışmaları, bina stoğunun olumsuz etkilerini azaltmak ve enerji tasarrufu hedeflerine ulaşmak için kritik bir konuma sahiptir. Bu amaçla enerji simülasyon modelleri oluşturmak farklı kent/bina senaryolarını analiz etme imkânı tanıdığı için hem maliyet hem de zaman verimliliği açısından avantaj sağlamaktadır. Bina enerji simülasyon modellerini (BES) kullanmak mimarlar, şehir plancıları, mühendisler, enerji danışmanları ve diğer ilgili profesyoneller için ortak bir çabadır. Çünkü, çok yönlü analiz yapma imkânı sayesinde bütüncül sonuçları, gelecek tahminleri ve kalibrasyon için ölçülebilir verileri sağlamaktadır. Bu nedenle, BES modellemesinin başlıca kullanım alanları; mimari tasarım, kent/ bina performans analizleri, ısıtma-havalandırma-iklimlendirme elemanlarının (HVAC) tasarımı ve işletimi, iyileştirme analizleri, finansal analizler ve model tahmini kontrolüdür. *Coakley, Raftery, ve Keane* [11] BES modellemesinin temel avantajlarını şu şekilde sıralamaktadır.

- Gelecek koşullarda tahmin yapabilme,
- Sistemin davranış ve performansını sağlarken kent/bina tasarım veya işletiminde değişiklik yapma imkânı sağlayabilme,
- Karmaşık sistem ve çevrelerde analiz yapabilme.

2. Bina Enerji Simülasyonu

Bina enerji simülasyonu, enerji performansını ve termal konforu kapsamlı bir şekilde hesaplayan matematiksel bir modeldir [12]. Enerji simülasyonu kapsamı, yöntemi ve ölçeği açısından üç şekilde incelenebilir.

- Enerji simülasyonu kapsamı açısından incelendiğinde model girdileri önem taşımaktadır. Başlıca model girdileri; iklim bilgisi, bina geometrisi, yapı malzeme detayları, kullanıcı bilgisi, HVAC sistem detaylarıdır [1, 13, 14, 5, 12].
- Enerji modellemesi, yöntemleri bakımından üçe ayrılmaktadır; *white-box*, *black-box* ve *grey-box* [15, 16, 5, 17]. *White-box* enerji modellemesinde en çok kullanılan temel yaklaşımlardan biridir [15, 17]. *Black-box*, makine öğrenimi algoritmalarını içerir [15, 17]. *Grey box* ise her iki yöntemin kullanıldığı karma bir yaklaşımdır [16].

- Enerji simülasyonu ölçeği bakımından kent ve bina ölçeği olarak iki grupta değerlendirilebilir. Kent ve bina ölçeğinde literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Chong vd. [12] makalelerin sadece %15' inin kent ölçeğinde olduğunu belirtmektedir. Ali vd. (2021), Web of Science veri tabanında incelediği makalelerin %63'ünün bina ölçeğinde, %37'sinin ise kent ölçeğinde olduğunu belirtmiştir [5]. Son yıllarda, sürdürülebilir kent araştırmalarının artmasıyla beraber kentsel ölçekte enerji modelleme çalışmalarının arttığı belirtilse de [3, 18], literatürdeki yapılan çalışmalar [1, 3, 5], kentsel ölçekte enerji modellemesi hakkında girdi verileri, simülasyon araçları, sonuçların değerlendirilmesi ve doğrulama teknikleriyle alakalı bir bilgi açığı olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumun tespit edilmesi, gelecekteki özgün çalışmalara zemin oluşturmaktadır.

Bina enerji simülasyonu aşamasında araştırmanın amacına uygun bir şekilde ilerleyebilmesi için planlanan araştırma yöntemine göre enerji simülasyon programının seçilmesi en kritik aşamalarından biridir.

2.1. Bina Enerji Simülasyon Programları

Bina enerji simülasyon alanında pek çok program bulunmaktadır. Konu ile ilgili yapılan literatür araştırmasında bina ve kent ölçeğinde enerji simülasyonu için sıklıkla kullanılan programlar şu şekildedir; TRNSYS [19], Dymola/Modelica [20], DOE-2 [21], CitySim [22], CityBES [23], UMI [24], URBANopt [25], OpenStudio [26], Radiance/Daysim [27], Grasshopper [28], EnergyPlus [29], e-Quest [30], Design Builder [31]. Bu programların kendi içlerinde avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Mesela, e-Quest [30] ve Design Builder [31] bina ölçeğinde enerji simülasyonu yaparken, diğer programlar kent ölçeğinde de analiz yapabilmektedir. Grasshopper [28] programı diğerlerinden farklı olarak SketchUp [32], Autodesk Revit [33] ve Rhino [34] gibi modelleme programlarıyla da uyum sağlayan parametrik analiz aracıdır.

Ayrıca, enerji simülasyon programları birbirleriyle koordinasyon sağlayarak veri aktarımı da yapabilmektedir. Bahsedilen 13 enerji simülasyon programının birbiriyle koordinasyon sağlama bakımından değerlendirilmesi Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu programlar yeşil renk ile belirtilmiştir. Tablonun tamamlanması için yararlanılan kaynakların başlıcaları şu şekildedir; [1], [12], [18], [35-50]. Yapılan değerlendirme sonucunda EnergyPlus [29] programının farklı programla uyum sağlama oranının en çok olduğu tespit edilmiştir. Grasshopper [28] ve OpenStudio [26] programlarının da önemli ölçüde potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Bina enerji simülasyon programları ve birbirleri ile olan koordinasyonları.

Programlar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Skor
TRNSYS [19]	1													6/12
Dymola/Modelica [20]	2													6/12
DOE-2 [21]	3													5/12
CitySim [22]	4													2/12
CityBES [23]	5													3/12
UMI [24]	6													3/12
URBANopt [25]	7													5/12
OpenStudio [26]	8													8/12
Radiance/Daysim [27]	9													7/12
Grasshopper [28]	10													8/12
EnergyPlus [29]	11													12/12
e-Quest [30]	12													3/12
Design Builder [31]	13													2/12

EnergyPlus [29], bina ısıtma, soğutma, aydınlatma, havalandırma ve diğer enerji akışlarını modellemek amacıyla kullanılan açık kaynaklı bir bina simülasyon programıdır. EnergyPlus [29] programı, Design-Builder [31], TRNSYS [19, 18], DOE-2 [21, 12, 18], OpenStudio [26], Radiance/Daysim [27], Urban Modeling Interface (UMI) [24], URBANopt (*Urban Renewable Building*

and Neighborhood Optimization) [25], CitySim [22], ve CityBES [23] gibi programlar ile koordinasyon halinde çalışabilmektedir. Bu durum, EnergyPlus [29] simülasyon aracının bina ve kentsel ölçekli modeller için yaygın olarak kullanılmasının ana nedenlerinden biri olabilir. Literatürde yapılan araştırmalar bu durumu destekler niteliktedir.

- Malhotra v.d (2021) “*girdi verileri, simülasyon araçları, simülasyon sonuçları ve doğrulama*” anahtar kelimelerini kullanarak 72 adet makale incelemiş ve araştırmaların %22’sinin EnergyPlus programı kullanarak simülasyon yaptığını belirlemişlerdir [1].
- Chong vd. [12] bina enerji simülasyonu hakkında incelediği 107 adet makalenin %60’ının EnergyPlus programı kullanarak bina enerji performans analizini yaptığını belirlemiştir.
- Franceschini & Neves ve Hong vd. en çok kullanılan bina enerji simülasyon programının EnergyPlus olduğunu belirtmişlerdir [14, 51, 52].
- Tian vd. (2018), uzmanlık alanları mimar mekanik mühendisi, yeşil bina danışmanı ve diğer ilişkili alanlarda olan 119 kişiye bina enerji simülasyon araçları hakkında sorular sorarak bir değerlendirme yapmışlardır [13]. Araştırmanın sonucunda en çok kullanılan enerji simülasyon programlarının sırasıyla %50,9 oranda EnergyPlus [29], %49,6 oranda eQUEST [30], ve %40,3 oranda ise Design-Builder [31] olduğunu tespit etmişlerdir.

Bina enerji simülasyonu sonucu elde edilen verilerin incelenmesi, sonuçların gerçek hesaplamalarla karşılaştırılması ile sağlayabilir. Araştırma yöntemine simülasyonun doğrulama aşamasını eklemek sonuçların güvenilirliğini artıran bir durumdur.

2.2. Simülasyonun Doğrulanması

Simülasyonun doğrulanması, modelin gerçek sonuçlarla karşılaştırılması sonucunda en doğru temsilinin belirlenmesi olarak açıklanabilir [12]. Güvenilir bir enerji simülasyon modeli elde etmek için doğrulama çalışmasının yapılması çok kritiktir [51]. Fakat, Malhotra (2021) vd. inceledikleri 72 adet makalenin sadece %7’sinin doğrulama çalışması yaptığını tespit etmişlerdir ki bu çok düşük bir orandır [1].

Doğrulama aşamasında enerji simülasyon sonuçları ile gerçek veriler arasında fark oluşabilir. Bu durum literatürde *Enerji Performans Açığı* olarak adlandırılmaktadır [17]. Enerji simülasyon sonuçlarını etkileyen kritik parametreler iklim verisi [12], bina kabuğu [12, 2], iç kazançlar, mahal ayar noktaları [53], HVAC sistem detaylarıdır [54, 2, 12]. İç kazançlar; kullanıcı profili, kullanıcı yoğunluğu, aydınlatma, ekipman ve kullanım programı olarak detaylandırılabilir [2, 12]. Literatürde, kullanıcı davranışının enerji simülasyon sonuçlarını etkileyen önemli bir rolü olduğunu ve bu durumunun bina iç ortam sıcaklığı ve enerji performansı arasındaki farka sebep olmasından dolayı enerji performans açığına neden olabileceğini belirtmektedir [1, 14, 55, 56]. Kullanıcı davranışındaki farklılık sebebiyle okul binalarında yapılan çalışmalar da önemli bir konuma sahiptir. Franceschini ve Neves (2022), literatürde okul binalarındaki kullanıcı davranışı tipolojisine yönelik çok az makale olduğunu belirtmiştir [14].

2.3. Simülasyonun Kalibrasyon Yöntemleri

Kalibrasyon, simülasyon sonucunu, gerçek veriler ile eşleştirerek model güvenilirliğini oluşturmak için sayısal parametrelerin düzenlenmesi sürecidir [12]. Kalibrasyon yöntemleri ASHRAE 14 [57], Uluslararası Performans Ölçüm ve Doğrulama Protokolü (IPMVP) [58] ve Federal Enerji Yönetimi Programı (FEMP) [59] standartları tarafından desteklenmektedir.

Tablo 2’de literatürde çoğunlukla yer alan kalibrasyon yöntemleri açıklanmaktadır. Bu yöntemler iç hava sıcaklığı, elektrik ve doğalgaz gibi bina enerji performansının kalibrasyonunun hesaplanması için uygundur. Tabloda bilgileri yer alan altı kalibrasyon yöntemi dışında literatürde farklı yöntemler de mevcuttur. Bunlar, ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) [12, 2, 5], yıllık yüzde hatası (APE) [12], ortalama kare hatası (MSE) [2], R-değeri [12, 2], ortalama mutlak hata (MAE) [12, 2], katsayı değişimi (CV) [5], Spearman-rho [2], ve MSE-R [2] dir. Fakat, literatürde bu yöntemlerin formülleri, simülasyon periyodu, hata payı hakkında sınırlı bilgi olmasından dolayı tabloya dahil edilememiştir.

Simülasyon kalibrasyon yöntemleri ile ilgili yapılan araştırmalarda en sık kullanılan kalibrasyon yöntemleri kök ortalama kare hatasıdır (RMSE), R-kare (R²), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama mutlak yüzde hatası olarak belirtilmiştir (MAPE) [2, 3, 14].

Tablo 2. Simülasyon kalibrasyon yöntemleri.

Kalibrasyon Yöntemleri			Standart	Periyod	Hata Payı	Makale
RMSE	Root Mean Square Error	Kök Kare Hatası	ASHRAE 14 [57]	Aylık Saatlik	%10-20 %10-20	[12, 54, 2, 3, 14, 51, 5]
CV(RMSE)	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error	Kök Varyasyon Katsayısı Kare Hatası	ASHRAE 14 [57] IPMVP [58] FEMP [59]	Aylık Saatlik Aylık Saatlik	%15 %30 %20 %15 %20	[12, 54, 51, 5, 60, 61]
MBE	Statistical Mean Bias Error	İstatistiksel Öngörülü Ortalama Hatası	ASHRAE 14 [57] IPMVP [58] FEMP [59]	Aylık Saatlik Aylık Saatlik Aylık Saatlik	%5 %10 %20 %5 %5 %10	[54, 14, 51, 60, 61]
NMBE	Normalised Mean Bias Error	Normalleştirilmiş İstatistiksel Öngörülü Ortalama Hatası	ASHRAE 14 [57] IPMVP [58] FEMP [59]	Aylık Saatlik Aylık Saatlik Aylık Saatlik	%5 %10 %20 %5 %10 %10	[12, 14, 51, 5]
GOF	Goodness of Fit	Uyum Hatası	ASHRAE 14 [57]	Aylık Saatlik	0.005'e olan yakınlık	[12, 56]
R ²	Coefficient of Determination	Belirleme Katsayısı	ASHRAE 14 [57] IPMVP [58]	Aylık Saatlik	0.999'a olan yakınlık	[54, 12]

SONUÇ

Bu çalışmada, kent/bina enerji simülasyonu, simülasyon programları, doğrulama ve kalibrasyon yöntemleri ile ilgili araştırma yapılması amaçlanmıştır. Araştırmanın sonucunda elde edilen bulguların literatürdeki açıkların giderilmesi ve gelecekteki özgün çalışmaların ortaya konmasına zemin oluşturma potansiyeli bulunmaktadır.

Araştırmanın temel sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Kentsel ölçekte yapılan araştırmalar bina ölçeğinde yapılan araştırmalara göre çok sınırlıdır.
- Kentsel ölçekte enerji modellemesi hakkında girdi verileri, simülasyon araçları, sonuçların değerlendirilmesi ve doğrulama teknikleriyle alakalı literatürde bir bilgi açığı vardır.
- Enerji simülasyon programları arasında EnergyPlus [29] programı hem kent hem de bina ölçeğinde en yaygın kullanılan simülasyon aracıdır.
- Literatürdeki çalışmalara göre, enerji simülasyon araçları arasında farklı programlarla koordinasyon sağlama açısından en yüksek potansiyeli olan programlar EnergyPlus [29], Grasshopper [28] ve OpenStudio [26]'dur.



- Simülasyonun doğrulama aşaması, sonuçların ve modelin güvenilirliği açısından çok önemlidir, fakat literatürde doğrulama çalışması yapan makale sayısı çok azdır.
- Kullanıcı davranışının doğru olarak analiz edilmesi simülasyonun doğrulaması için kritik bir aşamadır. Literatürde kullanıcı davranışı tipolojisinin araştırılmasına yönelik bilgi açığı bulunmaktadır.
- Literatürde en sık karşılaşılan kalibrasyon yöntemleri RMSE, R², MAE ve MAPE'dir.

KAYNAKLAR

- [1] MALHOTRA, A., BISCHOF, J., NICHERSU, A., HAFELE, K. H., EXENBERGER, J., SOOD, D., ... & SCHWEIGER, G., Information modeling for urban building energy simulation—A taxonomic review, *Building and Environment*, 208, 108552, 1-18, 2022.
- [2] AL-SHARGABI, A. A., ALMHAFDY, A., IBRAHİM, D. M., ALGHEITH, M., & CHICLANA, F., Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics: Research trends, taxonomy, and performance measures, *Journal of Building Engineering*, 54, 104577, 1-34, 2022.
- [3] DAHLSTRÖM, L., BROSTRÖM, T., & WIDEN, J., Advancing Urban Building Energy Modelling through new model components and applications: A review, *Energy and Buildings*, 266, 112099, 1-17, 2022.
- [4] Urbanization and Development: Emerging Futures, *World Cities Report 2016*, United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), Technical Report, 2016.
- [5] ALI, U., SHAMSI, M. H., HOARE, C., MANGINA, E., & O'DONNELL, J., Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods, and tools using qualitative and quantitative analysis, *Energy and buildings*, 246, 111073, 1-24, 2021.
- [6] The Paris Agreement, United Nations, Climate Action., 2015. <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>.
- [7] ENERJİ PERFORMANS BİNA DİREKTİFİ, The European Parliament and of The Council, 65-71, 2002.
- [8] ENERJİ PERFORMANS BİNA DİREKTİFİ (RECAST), The European Parliament and of The Council, 13-35, 2010.
- [9] ENERJİ PERFORMANS BİNA DİREKTİFİ, The European Parliament and of The Council, 11-117, 2015.
- [10] ENERJİ PERFORMANS BİNA DİREKTİFİ, The European Parliament and of The Council, 75-91, 2018.
- [11] COAKLEY, D., RAFTERY, P., & KEANE, M., A review of methods to match building energy simulation models to measured data, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123-141, 2014.
- [12] CHONG, A., GU, Y., & JIA, H., Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work, *Energy and Buildings*, 253, 111533, 1-21, 2021.
- [13] TIAN, Z., ZHANG, X., JIN, X., ZHOU, X., SI, B., & SHI, X., Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review, *Energy and Buildings*, 158, 1306-1316, 2018.
- [14] FRANCESHINI, P. B., & NEVES, L. O., A critical review on occupant behaviour modelling for building performance simulation of naturally ventilated school buildings and potential changes due to the COVID-19 pandemic, *Energy and Buildings*, 258, 111831, 1-16, 2022.
- [15] LI, Y., O'NEILL, Z., ZHANG, L., CHEN, J., IM, P., & DEGRAW, J., Grey-box modeling and application for building energy simulations-A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111174, 2021.
- [16] AHMAD, T., CHEN, H., GUO, Y., & WANG, J., A comprehensive overview on the data driven and large scale based approaches for forecasting of building energy demand: A review, *Energy and Buildings*, 165, 301-320, 2018.
- [17] COZZA, S., CHAMBERS, J., BRAMBILLA, A., & PATEL, M. K., In search of optimal consumption: A review of causes and solutions to the Energy Performance Gap in residential buildings, *Energy and Buildings*, 249, 111253, 1-15, 2021.

- [18] JOHARI, F., PERONATO, G., SADEGHIAN, P., ZHOA, X., & WIDEN, J., Urban building energy modeling: State of the art and future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109902, 1-16, 2020.
- [19] TRNSYS, <https://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [20] DYMOLA/MODELICA, <https://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola/>.
- [21] DOE-2, <https://www.doe2.com>.
- [22] VERMEULEN, T., KAMPF, J.H., BECKERS, B., Urban form optimization for the energy performance of buildings using citysim, *Proceedings of CISBAT 2013 Cleantech for Smart Cities and Buildings*, EPFL Solar Energy and Building Physics Laboratory, 2, 915-920, 2013.
- [23] HONG, T., CHEN, Y., LEE, S.H., PIETTE, M.A., Citybes: A web-based platform to support city-scale building energy efficiency, *Urban Computing* 14.1-9, 2016.
- [24] SUSTAINABLE DESIGN LAB. <https://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html>.
- [25] URBANOPT. <https://docs.urbanopt.net/>.
- [26] OPENSTUDIO. <https://openstudio.net/>.
- [27] RADSITE. <https://www.radiance-online.org/community/mailling-lists/archives/radiance-daysim>.
- [28] GRASSHOPPER 3D, <http://www.grasshopper3d.com/>.
- [29] ENERGYPLUS, Energy, <https://energyplus.net/>.
- [30] EQUEST, DOE2.com. <http://www.doe2.com/equest>.
- [31] DESIGN BUILDER, <https://designbuilder.co.uk/>.
- [32] SKETCHUP, www.sketchup.com.
- [33] AUTODESK, <http://www.autodesk.com/products/revit-family/overview>.
- [34] ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, <http://www.rhino3d.com/>.
- [35] SOLA, A., CORCHERO, C., SALOM, J., SANMARTI, M., Simulation tools to Build Urban-Scale Energy Models: A Review, *Energies*, 11, 2018.
- [36] ELSHEIKH, A., WIDL, E., PENSKY, P., DUBISCH, F., BRYCHTA, M., BASCIOTTI, D., MULLER, W., Modelica-enabled rapid prototyping via TRNSYS, In *13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 2013.
- [37] EDEN, A., A comparison of DOE-2 and TRNSYS solar heating system simulation, *Solar Energy Research Institute*, 721, 1980.
- [38] BADINO, E., FERRARA, M., SHTREPI, L., FABRIZIO, E., ASTOLFI, A., & SERRA, V., Modelling mean radiant temperature in outdoor environments: contrasting the approaches of different simulation tools, In *Journal of Physics: Conference Series*, 2069, 1, 012186, 2021.
- [39] TRNLizard-TRNSYS 18, <https://www.food4rhino.com/en/app/trnlizard>.
- [40] EL KONTAR, R., POLLY, B., CHARAN, T., FLEMING, K., MOORE, N., LONG, N., & GOLDWASSER, D., "URBANopt: An open-source software development kit for community and urban district energy modeling, National Renewable Energy Lab.(NREL), 2020.
- [41] FERRANDO, M., CAUSONE, F., HONG, T., & CHEN, Y., Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches, *Sustainable Cities and Society*, 62, 102408, 2020.
- [42] Spawn of EnergyPlus, <https://lbl-srg.github.io/soep/softwareArchitecture.html>.
- [43] SOLA, A., CORCHERO, C., SALOM, J., SANMARTI, M., Multi-domain urban-scale energy modelling tools: A review. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101872, 2020.
- [44] LAUZET, N., RODLER, A., MUSY, M., AZAM, M. H., GUERNOTI, S., MAUREE, D., COLINART, T., How building energy models take the local climate into account in an urban context—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109390, 2019.
- [45] GHCitySim, EPFL, <https://www.epfl.ch/labs/lipid/our-tools/gh-citysim/>.
- [46] CHEN, Y., HONG, T., PIETTE, M. A., Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis. *Applied Energy*, 205, 323-335, 2017.
- [47] REINHART, C., DOGAN, T., JAKUBIEC, J. A., RAKHA, T., SANG, A., Umi-an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability, In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 1, 476-483, 2013.
- [48] LONG, N., GAUTIER, A., ELARGA, H., ALLEN, A., SUMMER, T., KLUN, L., WETTER, M., Modeling district heating and cooling systems with URBANopt, GeoJSON to Modelica Translator, and the Modelica Buildings Library, In *Building Simulation Conference*, 2021.
- [49] ALI, U., SHAMSI, M. H., HOARE, C., MANGINA, E., O'DONNELL, J., Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy and buildings*, 246, 111073, 2021.

- [50] RALLAPALI, H. S., A comparison of EnergyPlus and eQUEST whole building energy simulation results for a medium sized office building, Arizona State University, 2010.
- [51] HOU, D., HASSAN, I. G., & WANG, L., Review on building energy model calibration by Bayesian inference, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 143, 110930, 1-17, 2021.
- [52] HONH, T., CHEN, Y., BELAFI, Z., Occupant behavior models: A critical review of implementation and representation approaches in building performance simulation programs, Building Simulation, 11, 1-14, 2018.
- [53] LIN, H.W., HONG, T., On variations of space-heating energy use in office buildings, Applied Energy, 111, 515-528, 2013.
- [54] LAKHDARI, K., SRITI, L., & PAINTER, B., Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions, Building and Environment, 204, 108173, 1-17, 2021.
- [55] HAPPLE, G., FONSECA, J. A., & SCHLUETER, A, A review on occupant behavior in urban building energy models, Energy and Buildings, 174, 276-292, 2018.
- [56] CIPRIANO, J., MOR, G., CHEMISANA, D., PEREZ, D., GAMBOA, G., & CIPRIANO, X., Evaluation of a multi-stage guided search approach for the calibration of building energy simulation models, Energy and Buildings, 87, 370-385, 2015.
- [57] ASHRAE GUIDELINE 14, Measurement of Energy and Demand Savings, ASHRAE Standards Committee, 2002.
- [58] INTERNATIONAL PERFORMANCE MEASUREMENT AND VERIFICATION PROTOCOL, 1, 2002.
- [59] FEDERAL ENERGY MANAGEMENT PROGRAM. <https://www.energy.gov/eere/femp/federal-energy-management-program>.
- [60] HERRIGAN, M., TURNER, W. J., & O'DONNELL, J., A statistically-based fault detection approach for environmental and energy management in buildings, Energy and Buildings, 158, 1499-1509, 2018.
- [61] LI, W., ZHOU, Y., CETIN, K., EOM, J., WANG, Y., CHEN, G., & ZHANG, X., Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures, Energy, 141, 2445-2457, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

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/analiz ve kentlerde afet riskine karşı dayanıklılığın artırılması üzerinedir.

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 Malzemesi ve Fizik Laboratuvarı'nın ulusal araştırma projelerinde araştırma öğrencisi olarak görev almıştır. Araştırma ilgi alanları, iklim değişikliğinin bina enerji performansı üzerindeki etkileri, binalarda enerji verimliliği ve yaklaşık/net-sıfır enerjili binalar konularını kapsamaktadır.

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 Malzemesi ve Fizik Laboratuvarı'nın ulusal araştırma projesinde araştırma öğrencisi olarak çalışmaya başlamıştır. Yüksek lisans çalışmalarında binalarda enerji verimliliği biyomimetik mimari ve adaptif cephe tasarımları konularını üzerine odaklanmaktadır.

Gizem AVGAN

1997 yılı Muğla doğumludur. Özyeğin Üniversitesi Mimarlık bölümünden 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 Malzemesi 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 yaklaşık/net-sıfır enerjili binalar konuları üzerine odaklanmaktadır.

Touraj ASHRAFIAN

Yüksek lisans eğitimini 2006 yılında, Tebriz İ.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.

Ece KALAYCIOĞLU 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 EKOMIM 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 günışığı 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.

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.

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.