



## The effect of ventilation rates determined based on the acceptable risk of COVID-19 infection in classrooms on energy consumption from heating

Hasan Murat Çetin\*

Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, Atatürk University, 25240, Erzurum, Türkiye

### Highlights:

- Ventilation based on acceptable COVID-19 infection risk level
- Correlation between probability of infection, number of cases and ventilation rate in classroom
- The effect of ventilation that determined based on infection risk on heating energy load

### Keywords:

- COVID-19 infection risk
- Ventilation rate
- Classroom
- Heating energy load

### Article Info:

Research Article

Received: 16.02.2023

Accepted: 18.06.2023

### DOI:

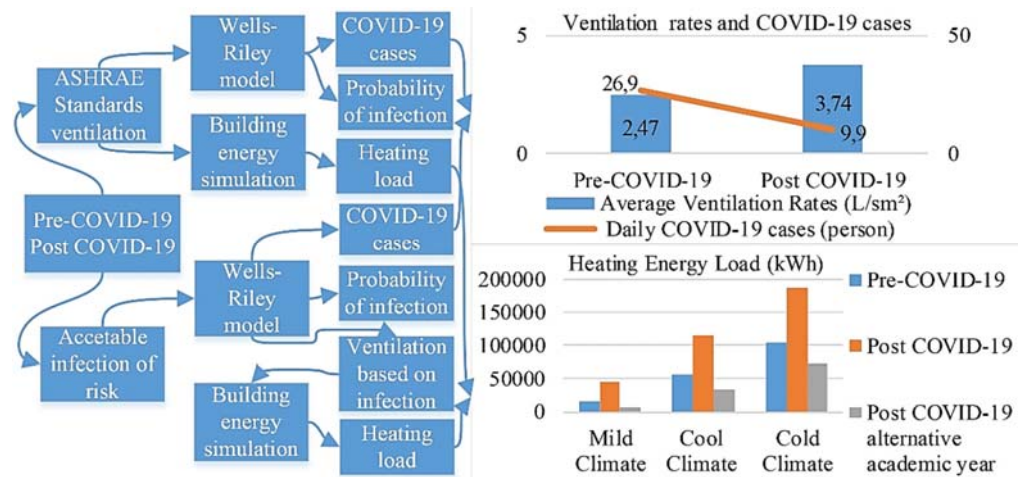
10.17341/gazimmfd.1252002

### Correspondence:

Author: Hasan Murat Çetin  
e-mail: hasanmurat.cetin@atauni.edu.tr  
phone: +90 532 651 1721

### Graphical/Tabular Abstract

In naturally ventilated higher education classrooms, the effect of ventilation rates that determined based on the risk of COVID-19 infection on infection probability, number of cases, heating energy load and the conceptual framework of the study are shown in Figure A.



**Figure A.** Conceptual framework, the effect of pre- and post-COVID-19 ventilation rates in classrooms, on the number of cases and heating energy demand

### Purpose:

In naturally ventilated higher education classrooms, it is aimed to determine the effect of ventilation rates determined based on acceptable infection risk under SARS-COV-2 global pandemic conditions on the number of COVID-19 cases, individual infection probability and heating energy load in various climates.

### Theory and Methods:

Ventilation rates, number of new cases, and infection probability were determined by the Wells-Riley model adapted to SARS-COV-2, which was used to model the probability of airborne infection. Heating load is calculated with EnergyPlus based building energy simulation according to the heat balance method. The proposed method was applied to university classrooms in cold climates as a case study.

### Results:

The findings showed that in order to ensure an acceptable risk of infection in classrooms, ventilation rates increased by 51.41% on average compared to pre-COVID-19, and the number of daily COVID-19 cases decreased by 63.19%. The increase in ventilation rates increased the annual heating energy load of classrooms to 192.37% with 29322 kWh in mild climate compared to pre-COVID-19; 98.80% with 57083 kWh in cool climate; In cold climates, it caused an increase of 79.21% with 82467 kWh. If the post-COVID-19 education period is adjusted according to natural ventilation conditions, the annual heating energy load is 86.52% in a temperate climate; 69.60% in cool climate; and it has been observed that it can decrease by 61.40% in cold climates.

### Conclusion:

The results show that we can be prepared better for airborne diseases and possible other outbreaks in the future. The significant differences in heating loads in various climates have shown that the planning of the education period and strategies for energy efficiency should be considered separately according to the different climates to ensure COVID-19 infection control.



## Dersliklerde kabul edilebilir COVID-19 enfeksiyon riskine dayalı belirlenen havalandırma oranlarının ısıtmadan kaynaklanan enerji tüketimine etkisi

Hasan Murat Çetin\*

Atatürk Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 25240, Yakutiye, Erzurum, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Kabul edilebilir COVID-19 enfeksiyon riskine dayalı havalandırma
- Dersliklerde enfeksiyon olasılığı, vaka sayısı ve havalandırma oranı arasındaki ilişki
- Enfeksiyon riskine dayalı havalandırmanın ısıtma yüküne etkisi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.02.2023

Kabul: 18.06.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1252002

#### Anahtar Kelimeler:

COVID-19 enfeksiyon riski,  
havalandırma oranı,  
derslik,  
ısıtma enerji yükü

#### ÖZ

Bu çalışmada, SARS-CoV-2 salgınında doğal havalandırılan yükseköğretim dersliklerinde, kabul edilebilir enfeksiyon riskine dayalı belirlenen havalandırma oranlarının COVID-19 vaka sayısına, enfeksiyon olasılığına ve çeşitli iklim bölgelerinde ısıtmadan kaynaklanan enerji tüketimine etkisi araştırılmıştır. Havalandırma oranları, yeni vaka sayısı ve enfeksiyon olasılığı hava kaynaklı enfeksiyon olasılığının modellenmesinde kullanılan SARS-CoV-2'ye uyarlanmış Wells-Riley modeliyle belirlenmiştir. Isıtmadan kaynaklanan enerji tüketimi, ısı dengesi metoduna göre EnergyPlus tabanlı bina enerji simülasyonu ile hesaplanmıştır. Önerilen yöntem, vaka çalışması olarak farklı iklimde bölgelerinde bulunan üniversite dersliklerine uygulanmıştır. Bulgular, dersliklerde kabul edilebilir enfeksiyon riskinin sağlanabilmesi için havalandırma oranlarının COVID-19 öncesine göre ortalama %51,41 arttığını, günlük COVID-19 vaka sayısının ise COVID-19 öncesi dönemin şartlarına göre ortalama %63,19 azaldığını göstermiştir. COVID-19 sürecinde artan havalandırma oranları, dersliklerin ısıtmadan kaynaklı enerji tüketiminin COVID-19 öncesine göre ılıman iklimde %192,37 (29322 kWh); soğuk iklimde %98,80 (57083 kWh); çok soğuk iklimde ise %79,21 (82467 kWh) artmasına sebep olmuştur. COVID-19 sürecinde doğal havalandırılan dersliklere sahip üniversitelerde, eğitim öğretim dönemi, havalandırmanın iç ortam termal konfor kontrolü için uygun olduğu dönemlere göre belirlenmelidir. Bu durumda, ısıtmadan kaynaklanan enerji tüketimi ılıman iklimde %86,52; soğuk iklimde %69,60; çok soğuk iklimde ise %61,40 oranında azalmaktadır. Bu sonuçlar, gelecekte hava yoluyla bulaşan hastalıklara ve olası diğer salgınlara iklimsel farklılıklara göre daha iyi hazırlanabileceğini göstermektedir.

## The effect of ventilation rates determined based on the acceptable risk of COVID-19 infection in classrooms on energy consumption from heating

### H I G H L I G H T S

- Ventilation based on acceptable COVID-19 infection risk level
- Correlation between probability of infection, number of cases and ventilation rate in classroom
- The effect of ventilation that determined based on infection risk on heating energy load

#### Article Info

Research Article

Received: 16.02.2023

Accepted: 18.06.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1252002

#### Keywords:

COVID-19 infection risk,  
ventilation rate,  
classroom,  
heating energy load

#### ABSTRACT

In this study, the effect of ventilation rates determined based on acceptable infection risk on the number of COVID-19 cases, probability of infection and heating energy load in various climatic regions in naturally ventilated higher education classrooms during the SARS-CoV-2 pandemic were investigated. Ventilation rates, number of new cases and probability of infection were determined by the Wells-Riley model adapted to SARS-CoV-2, which was used to model the probability of airborne infection. The annual heating energy load was calculated with the EnergyPlus based building energy simulation according to the heat balance method. The proposed method was applied to university classrooms in different climatic regions as a case study. The findings showed that ventilation rates increased by 51,41% on average compared to pre-COVID-19, and the number of daily COVID-19 cases decreased by an average of 63.19% compared to the conditions of the pre-COVID-19 period to ensure an acceptable infection risk in classrooms. The increase in ventilation rates increased the annual heating energy loads of classrooms to 192.37% with 29322 kWh in a temperate climate compared to pre-COVID-19; by 98.80% with 57083 kWh in cold climate; and by 79.21% with 82467 kWh in very cold climates. In universities with naturally ventilated classrooms during the COVID-19 process, the academic year should be determined according to the periods when ventilation is suitable for indoor thermal comfort control. In this case, the energy consumption due to heating is 86.52% in a temperate climate; 69.60% in a cold climate; in very cold climates, it decreases by 61.40%. These results show that we can better prepare for airborne diseases and other possible epidemics in the future, according to climatic differences.

## 1. Giriş (Introduction)

COVID-19 küresel salgınında okullarda yeniden yüz yüze eğitime dönüş sürecinde, SARS-CoV-2 enfeksiyonunun derslikler gibi kalabalık iç ortamlarda yayılmasının engellenmesi için uluslararası kuruluşlar veya hükümet yetkilileri tarafından birçok önlem açıklanmıştır. Bu önlemlerden biri de taze havalandırma şartlarıdır. Birçok araştırmacı, yapılan çalışmalara göre SARS-CoV-2 virüsünün hava yoluyla bulaşabileceğini [1] ve havada 3 saate kadar kalabileceğini düşünmektedir [2]. Yapılan çalışmalar, kapalı mekânlarda, hava yoluyla gerçekleşen COVID-19 enfeksiyonunu azaltmanın temel yollarından birinin, virüs konsantrasyonunu azaltabilecek taze havalandırma şartlarının sağlanması olduğunu göstermektedir [3-6]. Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) yetersiz havalandırılan yerleri COVID-19 enfeksiyonu açısından riskli kabul etmektedir. Tüm bu gelişmeler, havalandırma oranlarının COVID-19 enfeksiyonu üzerindeki etkisinin önemli olduğunu göstermektedir.

COVID-19 pandemi sürecinde, dersliklerde SARS-CoV-2 enfeksiyon riskini azaltmak için taze hava miktarının artması yönünde fikir birliği olsa da tam olarak ne kadar gerektiği konusunda bir belirsizlik vardır. Yetersiz havalandırma enfeksiyon riskinin artmasına sebep olabilir. Kontrolsüz havalandırma ile derslikler gibi kalabalık alanlarda SARS-CoV-2 virüsünün hava yoluyla bulaşması azaltılabilir, ancak bu sefer de bina enerji verimliliği açısından sorunlar oluşabilir [7]. Havalandırma oranları ile enfeksiyon riski arasındaki belirsizlik, hem enfeksiyon kontrolünün sağlanmasında hem de özellikle doğal havalandırılan okullarda ısıtma soğutma enerji yüklerinde belirsizliğe sebep olmaktadır. Bu durum COVID-19 gibi salgınlarda sürdürülebilir bir eğitim için önemli bir sorun haline gelmektedir.

Günümüzde birçok okulda, havalandırma yalnızca pencereler ile doğal havalandırma ile sağlanmaktadır [8]. Bu yüzden COVID-19 salgınında eğitimin kesintiye uğramadan devam edebilmesi için hem enfeksiyon riskini azaltan havalandırma şartlarının belirlenmesi hem de buna bağlı olarak artan bina enerji taleplerinin belirlenerek enerji verimliliğine yönelik stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, okullarda SARS-CoV-2 enfeksiyonunun azaltılması için öncelikle Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE), Avrupa Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme Dernekleri Federasyonu (Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, REHVA) ve WHO gibi uluslararası kuruluşlar ile birçok araştırmacının havalandırma şartları ile ilgili önerileri detaylıca irdelenmiştir.

ASHRAE, COVID-19 salgını sürecinde okullar ve üniversiteler için yayınlamış olduğu raporda, havalandırma oranları ile ilgili net bir değer belirtmemiştir fakat COVID-19 öncesi ANSI/ASHRAE 62.1 Standardına göre belirlenen minimum havalandırma gereksinimlerinden daha fazla havalandırma gerektiğini belirtmiştir [9]. REHVA, okullar için "EN 16798-1: 2019" havalandırma standardında bulunan 3 kategori arasından daha yüksek havalandırma oranına sahip Kategori I havalandırma oranını veya dersliklerde kişi başına 8-10 L/s taze havalandırma oranının enfeksiyon riskinin azaltılması için başlangıç olabileceğini ifade etmektedir [10]. WHO ise konut dışındaki doğal havalandırılan yapılar için EN 16798-1: 2019 standardını referans göstererek kişi başına minimum 10 L/s taze havalandırma oranı önermektedir [11]. Allen ve Ibrahim [12], COVID-19 sürecinde sınıflarda 4-6 ACH (air change hour, saatte hava değişim oranı) havalandırma oranlarının hedeflenmesi gerektiğini söylemektedir. Harvard'da okulların yeniden açılması için alınması gereken önlemlerden bahseden çalışmada, dersliklerde havalandırma oranları için 3 ACH'in düşük olduğu, 4-6 ACH arasında olması gerektiğini ve 6 ACH'in en ideal senaryo olduğu belirtilmiştir [13].

Hui Dai ve Bin Zhao [14], dersliklerde 2 saat boyunca virüse maruz kalındığında COVID-19 enfeksiyon olasılığını %1'in altında tutulması için gereken havalandırma oranlarının 2-7 ACH arasında değiştiğini ifade etmiştir. Hou vd. [15], üç farklı okulun üç farklı sınıfında yaptığı çalışmada, SARS-CoV-2'nin yayılmasını önlemek için havalandırma oranlarının dersliklere göre 3 ile 8 ACH arasında değiştiğini bildirmiştir.

Dersliklerde havalandırma şartlarının COVID-19 enfeksiyonu üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalar değerlendirildiğinde, iki farklı havalandırma yaklaşımın ön plana çıktığı görülmektedir. Birincisi, REHVA ve WHO'nun önerisi gibi COVID-19 öncesine göre artan fakat sabit olan havalandırma oranlarıdır. İkincisi ise dersliklerde enfeksiyon olasılığının matematiksel modellenmesine göre belirlenen ve oldukça değişkenlik gösteren havalandırma oranlarıdır. İki yaklaşımdan elde edilen sonuçlar, dersliklerdeki mekânsal ve kullanım koşullarına bağlı olarak değişen enfeksiyon riskinden dolayı, havalandırma oranlarının önemli ölçüde değişebileceğini göstermiştir. WHO VE REHVA'nın COVID-19 sürecinde önerdiği EN 16798-1: 2019 Kategori I havalandırma standardı, COVID-19 öncesi insanlardan ve binadan kaynaklanan emisyonlara bağlı olarak kullanıcılar tarafından algılanan hava kalitesi ve termal konfor kriterlerine göre belirlenmiştir. Kurnitski vd. [16]'nin yaptığı çalışma, EN 16798-1 standardında belirtilen Kategori I havalandırma oranının, boyutları ve kullanıcı sayıları farklı olan bazı dersliklerde enfeksiyon riski açısından yeterli olabileceğini bazı dersliklerde ise yeterli olamayacağını göstermiştir. Bu durum, COVID-19 salgını sürecinde dersliklerde enfeksiyon kontrolünün sağlanması için gereken havalandırma oranlarının enfeksiyon riskinin modellendiği matematiksel modellere göre belirlenmesinin önemini göstermektedir. Ayrıca bu yaklaşımla, dersliklerde gereğinden fazla havalandırma oranlarının önüne geçilerek sınırlı kaynaklara sahip Türkiye gibi ülkelerde enerji verimliliği açısından avantaj sağlanabilir.

Riley vd. [17] bir ilköğretim okulu dersliğinde, hava yoluyla bulaşan kızamık salgınının kontrol edilmesi için enfeksiyon riskini matematiksel olarak değerlendirmek için Wells-Riley denklemini geliştirmiştir. Wells-Riley modeli, oda veya küçük bina ölçeğindeki kapalı mekânlarda hava kaynaklı enfeksiyon olasılığının hızlı bir şekilde modellenmesinde kullanılmaktadır [18, 19]. Günümüzde ise hava yoluyla bulaşan COVID-19 enfeksiyon riski ile havalandırma stratejisi arasındaki ilişkiyi analiz eden çalışmalarda yaygın olarak kullanılmıştır [20-23]. REHVA da binalarda SARS-CoV-2 virüsünün yayılmasını engellenmesi için yayınlamış olduğu raporda, COVID-19'a göre uyarlanmış Wells-Riley modeliyle kapalı mekânlar için gereken taze havalandırma oranının hesaplanabileceğini ifade etmiştir [10]. Yılmazoğlu [24], Wells-Riley denklemini kullanarak kapalı iç ortamlarda COVID-19 enfeksiyon riski ve gerekli havalandırma oranlarının belirlenmesi için bir hesaplama aracı geliştirmiş ve bu hesaplama aracı Gazi Üniversitesi resmi web sayfasında [25] yayınlamıştır. Kurnitski vd. [16], COVID-19 Task Force of REHVA's Technology and Research Committee [10] tarafından SARS-CoV-2'ye göre modifiye edilen Wells-Riley denkleminin kabul edilebilir enfeksiyon risk seviyeleri için gereken havalandırma oranlarını hesaplamayı sağlayan yeni bir denklem üretmiştir. Bu denklemde Yılmazoğlu [24] tarafından geliştirilen hesaplama aracıdaki parametrelere ek olarak, SARS-CoV-2 virüs inaktivasyon oranı ve virüsün yüzeylerde birikme kaybı oranı da eklenmiştir. Bu durum, Wells-Riley denklemi kullanılarak yapılan çalışmalarda sonuçların bazen aynı olmayabileceğini göstermektedir. Bu yüzden Wells-Riley denklemiyle yapılan çalışmalarda, enfeksiyon riskinin daha doğru belirlenebilmesi için denklemdeki parametreler geliştirilmeli ve denklemde yer alan parametreler güncel çalışmalara göre uyarlanmalıdır.

Park vd. [26], doğal havalandırılan dersliklerde, pencerelerin açılma şartlarına göre izleyici gaz yöntemiyle havalandırma oranlarını hesaplamıştır ve Wells-Riley denklemiyle COVID-19 enfeksiyon kontrolünün sağlanabilmesi için gereken havalandırmanın doğal havalandırma ile sağlanabileceğini fakat bu durumda soğuk iklimlerde ısıtmadan kaynaklanan enerji ihtiyacının ayrıca araştırılması gerektiğini belirtmiştir. COVID-19 sürecinde, değişen havalandırma şartlarının okullarda enerji tüketimine etkisine yönelik gerçekleştirilen çalışmalarda [27-29], havalandırma oranları genellikle uluslararası kuruluşların önerdiği sabit havalandırma oranları üzerinden değerlendirilmiştir. Halbuki literatür değerlendirmesinde incelenen araştırmalar, enfeksiyon riskine dayalı belirlenen havalandırma oranlarının dersliklerin koşullarına göre önemli oranda değişkenlik gösterebileceğini ve bu durumun da aşırı havalandırmanın önüne geçerek enerji verimliliği açısından avantaj sağlayabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada, doğal havalandırma yükseköğretim dersliklerinde COVID-19 sürecinde kabul edilebilir enfeksiyon riskine göre belirlenen havalandırma oranlarının ılıman, soğuk ve çok soğuk iklimlerde ısıtmadan kaynaklı enerji tüketimine etkisi araştırılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla Türkiye’de soğuk ve ılıman iklimlerde, COVID-19 enfeksiyon riskine dayalı havalandırma yaklaşımının dersliklerde yeni vaka sayısı, enfeksiyon olasılığı ve dersliklerin ısıtma enerji talebi üzerindeki etkisini aynı anda irdeleyen başka bir çalışmaya henüz rastlanmamıştır. Yüksel vd. [30], Türkiye’de sıcak nemli iklimdeki camilerde COVID-19 kısıtlamalarının enerji tüketimi etkisine yönelik bir çalışma yapmıştır ve pandemi koşullarında değişen şartların etkisinin doğrudan belirlenmesi için sayısal simülasyonlarla desteklenmesi gerektiğini ifade etmiştir. SARS-CoV-2 küresel salgını gibi olağanüstü durumlarda, okullarda eğitimin kesintisiz bir şekilde devam edebilmesi için hem enfeksiyon kontrolünün sağlanması hem de enerji verimliliği açısından gerekli stratejiler sayısal simülasyonlarla belirlenebilir.

COVID-19 sürecinde değişen havalandırma gereksinimlerinin enfeksiyon riskine dayalı belirlenmesi, dersliklerde hem enfeksiyon kontrolünün sağlanması hem de artan enerji taleplerinin karşılanabilmesi için ek iklimlendirme sistemlerinin daha doğru belirlenebilmesine olanak sağlayabilir. Ayrıca doğal havalandırma dersliklerde, COVID-19 sürecinde gereken havalandırmanın, dış sıcaklığın iç mekan termal konfor için daha uygun olduğu dönemlerde gerçekleştirilmesi hem enfeksiyon kontrolünün sağlanmasında hem de ısıtmadan kaynaklı enerji tüketimini azaltabilir. Bu çalışmada, kabul edilebilir enfeksiyona dayalı havalandırma oranlarının ısıtma yüküne etkisi ayrıca aylara göre değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilecek sonuçlar, COVID-19 gibi olağanüstü durumlarda akademik takvimin iklimlere göre yeniden değerlendirilmesine olanak sağlayabilir. Bu çalışmanın sonuçları yalnızca SARS-CoV-2 küresel salgını ile sınırlı kalmayabilir. Riley vd. [17] tarafından bir ilköğretim okulunda kızamık salgını kontrol edilmesi için geliştirilen Wells-Riley modeli, tıpkı SARS-CoV-2 enfeksiyonunda olduğu gibi gelecekte hava yoluyla bulaşabilen başka hastalıklar için de uygulanabilir.

Çalışma kapsamında, kabul edilebilir enfeksiyon riski için gereken havalandırma oranları hesaplanmış olup COVID-19 vaka sayısı ve bireysel enfeksiyon olasılığı arasındaki karmaşık ilişki analiz edilmiştir. Ardından kabul edilebilir enfeksiyon riski için gereken havalandırma oranlarının ılıman, soğuk ve çok soğuk iklimde yıllık ısıtma enerji talebi üzerindeki etkisi incelenmiş olup COVID-19 öncesi döneme göre analiz edilmiştir.

## 2. Yöntem (Method)

Çalışmanın yöntemi dört aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, vaka çalışması olarak seçilen yükseköğretim dersliklerinin fiziksel

özellikleri ve doluluk oranı gibi kullanım şartları açıklanmaktadır. İkinci aşamada, dersliklerde kabul edilebilir enfeksiyon riski belirlenerek Wells-Riley modeliyle enfeksiyon riskine dayalı havalandırma oranları, enfeksiyon olasılığı ve COVID-19 vaka sayısı hesaplanmıştır. Üçüncü aşamada, havalandırma oranları dışında bina enerji talebini etkileyen diğer parametreler (tasarım parametreleri, iklimsel koşullar, bina kabuğu termo-fiziksel özellikleri, doluluk-ışletme parametreleri ve iç kazançlar gibi) belirlenerek enerji simülasyonu girdi parametreleri tanımlanmıştır. Dördüncü aşamada, vaka çalışmasındaki dersliklerin enerji modeli oluşturularak ısıtma enerji talebinin baskın olduğu farklı iklimlerde enfeksiyon riskine dayalı havalandırma senaryolarının yıllık ısıtma enerji yükleri hesaplanmıştır. Isıtma enerji yükü, gerçek hava verileri kullanılarak 12 aylık dönemde 8760 saatin tamamı için, Building Energy Simulation Test prosedürü (BESTEST) ile doğrulanmış [31] ve ABD Enerji Bakanlığı tarafından geliştirilen EnergyPlus [32] ile hesaplanmıştır.

### 2.1. Vaka Çalışması (Case Study)

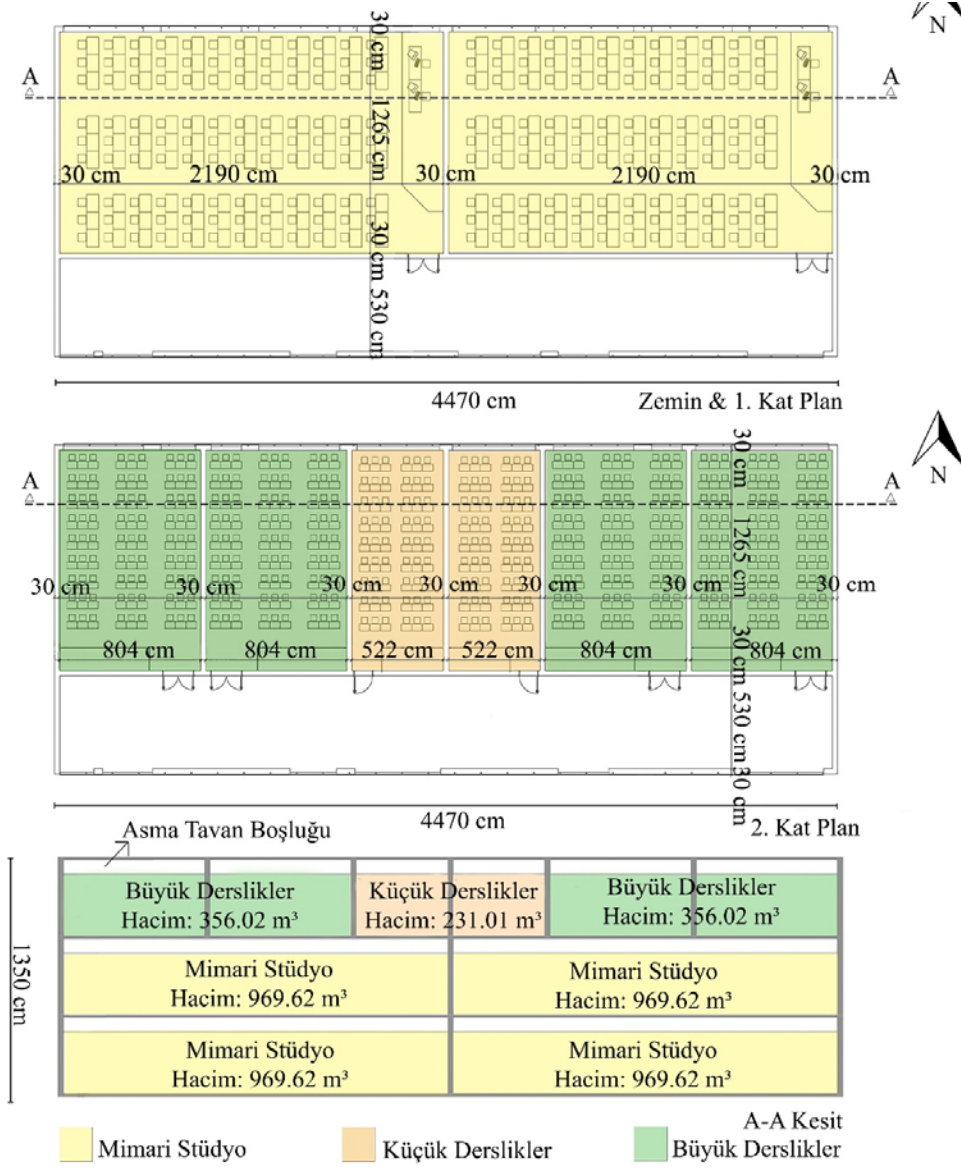
Bu çalışmada referans bina olarak 2018 yılında hizmete giren, 39°53'36.33"K enlem ve 41°13'51.30"D boylamında bulunan Erzurum Atatürk Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi binasının derslikleri seçilmiştir. Derslikler dışındaki koridor, ara holler, akademisyen ofisleri gibi mekânların kullanıcı sayısı ve kullanım zamanları değişkenlik gösterdiği için çalışma sadece dersliklerle sınırlı tutulmuştur. Dersliklerde taze havalandırma ihtiyacı, pencereler ile doğal havalandırma yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Mimarlık derslik bloğunda farklı boyutlarda stüdyolar, büyük ve küçük teorik derslikler yer almaktadır. Her biri 108 kişilik kapasiteye sahip olan 4 adet mimari stüdyo dersliğinin ikisi zemin ve ikisi 1. katta bulunmaktadır. Derslik bloğunun zemin ve 1. kat planları aynıdır. 81 kişilik kapasiteye sahip büyük derslikler ile ve 54 kişilik kapasiteye sahip küçük derslikler ise 2. katta yer almaktadır. 2. katta 4 adet büyük, 2 adet küçük derslik vardır. Derslik bloğuna ait kat planı, kesitleri ve derslik ölçüleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Mevcut şartlarda dersliklerde kişi başına düşen alan mimari stüdyo dersliğinde 2,65 m<sup>2</sup>; büyük derslikte 1,25 m<sup>2</sup>; küçük derslikte ise 1,22 m<sup>2</sup>’dir. Kabul edilebilir iç hava kalitesinin belirlendiği ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019’a göre dersliklerde kişi başına düşen alan 1,53 m<sup>2</sup> olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada dersliklerin kapasitesi ANSI/ASHRAE 62.1-2019’a göre kabul edilmiştir. COVID-19 sonrası dersliklerin kapasitesi sosyal mesafe kuralına göre %50 seyreltilmiştir. Dersliklerin mekânsal boyutları ve kapasitelerine ait genel bilgiler Tablo 1’de gösterilmiştir.

### 2.2. Wells-Riley Modeliyle Havalandırma Oranı, Enfeksiyon Olasılığı ve Yeni Vaka Sayısının Belirlenmesi (Determination of Ventilation Rate, Probability of Infection and Number of New Cases with Wells-Riley Model)

#### 2.2.1. Kabul edilebilir enfeksiyon risk seviyesinin belirlenmesi (Determination of acceptable infection risk level)

Salgın hastalıklarda kabul edilebilir enfeksiyon riskinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar vardır. Enfeksiyon riski düzeyinin belirlenmesi için genellikle temel üreme sayısı ( $R$ ) veya enfeksiyon olasılığı ( $P_i$ ) kavramı kullanılmaktadır. Enfeksiyon olasılığı ( $P_i$ ), yeni vaka sayısı (vaka sayısı,  $C$  veya  $R$ ) ile maruz kalan duyarlı bireylerin sayısı ( $S$ ) arasındaki orandır [16], [33]. Enfeksiyon olasılığı, genellikle temel üreme sayısı ( $R$ ) cinsinden ifade edilmektedir [34]. COVID-19 pandemisinde, hastalığın duyarlı popülasyonda azalması için temel üreme sayısı  $R < 1$  önerilmektedir [35, 36]. Bu yüzden bu çalışmada, COVID-19 sonrası minimum havalandırma oranlarının belirlenmesinde kabul edilebilir enfeksiyon riski olarak yeni vaka temel üreme sayısı 0,99 olarak kabul edilmiştir.





Şekil 1. Derslik bloğu kat planı ve kesitler (Classroom block floor plans and section)

Tablo 1. Dersliklerin mekânsal boyutları ve kapasiteleri (Spatial dimensions and capacities of classrooms)

Derslikler	Derslik Sayısı	Net Alan (m <sup>2</sup> )	Asma Tavan Yüksekliği (m)	COVID-19 Öncesi Şartlar (ANSI/ASHRAE 62.1-2019)		COVID-19 Sonrası Şartlar (Sosyal Mesafe)	
				Kişi Sayısı	Kişi Başına Düşen Alan (m <sup>2</sup> )	Kişi Sayısı	Kişi Başına Düşen Alan (m <sup>2</sup> )
Mimari Stüdyo	4	277,035	3,50	181	1,53	90	3,84
Küçük Teorik	2	66,004	3,50	43	1,53	21	2,44
Büyük Teorik	4	101,200	3,50	66	1,53	33	2,54

### 2.2.2. Wells-Riley modelinin SARS-CoV-2'ye uyarlanması (Adaptation of the Wells-Riley model to SARS-CoV-2)

Kabul edilebilir enfeksiyon riskine göre havalandırma oranlarının belirlenmesi için Wells-Riley denkleminde dayanan modeller detaylı incelenmiştir. Riley vd. [17] tarafından kızamık salgını üzerine yapılan epidemiyolojik bir çalışmada geliştirilen Wells-Riley denklemi Eş. 1'de gösterilmektedir.

$$P_1 = \frac{C}{S} = 1 - \exp\left(-\frac{Iap^t}{Q}\right) \quad (1)$$

Bu formülde  $P_1$  enfeksiyon olasılığı,  $C$  enfeksiyon vakalarının sayısı,  $S$  duyarlı olanların sayısı,  $I$  enfekte kişi sayısı,  $p$  bir kişinin pulmoner ventilasyon hızı,  $q$  kuantum oluşturma hızı,  $t$  virüse maruz kalma zaman aralığı ve  $Q$  (m<sup>3</sup>/h) iç ortama sağlanması gereken taze hava miktarıdır. Bu denkleme göre, taze hava miktarı ( $Q$ ) hariç diğer

parametreler bilindiği takdirde hedeflenen enfeksiyon olasılığı için iç ortama sağlanması gereken taze hava miktarı bulunabilir. Gazi Üniversitesi web sayfasında paylaşılan enfeksiyon olasılığı hesaplama aracı ise orijinal Wells-Riley denklemine dayanmaktadır.

REHVA, SARS-CoV-2 enfeksiyon riski değerlendirme modelinin fizibilitesini artırmak için çeşitli araştırmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda Gammaitoni and Nucci [37] tarafından değiştirilen Wells-Riley denklemi SARS-CoV-2'ye göre kalibre etmiştir. Kurnitski vd. [16], SARS-CoV-2'ye göre kalibre edilen Wells-Riley matematiksel modelinden havalandırma oranlarının doğrudan hesaplanabildiği yeni bir denklem türetmişlerdir. Orijinal Wells-Riley modelinden farklı olarak SARS-CoV-2'nin yüzeyde birikme kaybı oranı ve virüs bozunması parametrelerinin de dikkate alınarak havalandırma oranlarının hesaplandığı denklem Eş. 2'de gösterilmiştir [16].

$$Q = \frac{qQ_b D}{\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)} - (\lambda_{dep} + k)V \quad (2)$$

Bu formülde:  $q$ , enfekte kişilerin kuantum oluşturma hızıdır (quanta/(h kişi));  $Q_b$ , bir kişinin pulmoner ventilasyon oranıdır ( $m^3/h$ );  $D$ , virüse maruz kalma süresidir (h);  $I$ , enfekte kişilerin sayısıdır;  $n$ , solunan kuantum oranıdır;  $p$ , duyarlı kişilerin enfeksiyon olasılığıdır;  $\lambda_{dep}$ , virüsün yüzeylerde birikme kaybı oranıdır (1/h);  $k$ , virüsün inaktivasyon oranıdır (1/h);  $V$ , kapalı mekanın hacmidir ( $m^3$ ).

Çalışmanın sonuçlarının doğruluğu açısından modifiye edilmiş Wells-Riley matematiksel modelinde yer alan tüm parametrelerin değerlerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden Wells-Riley ve SARS-CoV-2 virüsüne yönelik ilgili literatür kapsamlı şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında SARS-CoV-2'ye göre geliştirilmiş Wells-Riley modelindeki parametreler, kabul edilen değerler ve modeldeki parametreler üzerine yapılan güncel makaleler Tablo 2'de özetlenmektedir.

Kuantum emisyon hızı ( $q$ ), doğrudan elde edilemez, ancak salgın sırasında hastalığın saldırı hızının ( $P$ ) olarak değiştirildiği bir salgın durumundan epidemiyolojik olarak tahmin edilir [23]. Günümüzde SARS-CoV-2 kuantum emisyon hızı ile ilgili belirsizlikler olsa da Tablo 2'de görüldüğü üzere birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada kuantum emisyon hızı ( $q$ ) Buonanno vd. [45] tarafından yapılan çalışmaya göre belirlenmiştir. Kuantum emisyon hızı, oturarak ders dinleyen ve derste konuşmayan öğrenci için kabul edilen 4 q/h ile oturarak ders dinleyen ve derste konuşan öğrenci için kabul edilen 9,7 q/h değerinin ortalaması olan 6,85 q/h değeri kabul edilmiştir. Elde edilen kuantum emisyon hızı, orijinal Wuhan virüsü dışında SARS-CoV-2 varyantına göre ayrıca ele alınmıştır. SARS-CoV-2 varyantları olarak yayınlanan en güncel çalışma, Lyngse vd. [52] tarafından Omicron BA.2 varyantı için yayınlanan çalışmadır. Bu doğrultuda mevcut kuantum emisyon hızı (6,85 q/h), Omicron BA.2 varyantı için önerilen 3.3 faktör katsayısına göre 22,6 q/h olarak kabul edilmiştir.

Dersliklerdeki enfekte kişi sayısı ( $I$ ), minimum havalandırma oranının belirlenmesi için daha önceki çalışmalarda olduğu gibi [26, 33, 51] bir kişi olarak kabul edilmiştir. Kurnitski vd. [16]'e göre ayrıca bu sayı genel popülasyondaki 1:100 veya 1:1000 büyüklüğündeki tipik

COVID-19 enfeksiyon oranları ile uyumluluk göstermektedir. COVID-19 öncesi ve sonrası için virüse duyarlı kişi sayısı, Tablo 1'de gösterilen derslik kapasitelerine göre belirlenmiştir. COVID-19 öncesi şartlara göre dersliklerdeki vaka sayısı ve enfeksiyon olasılığı ise ANSI/ASHRAE 62.1-2019 Standardında belirtilen kişi başı 3,8 L/s taze havalandırma oranına göre hesaplanmıştır [53].

### 2.3. Bina Enerji Simülasyonu Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi (Determination of Building Energy Simulation Input Parameters)

Bina enerji simülasyonu için ana girdi parametreleri şunlardır: temsili iklim bölgeleri, meteorolojik hava verileri, bina geometrisi, bina kabuğu genel bilgileri, bina kabuğunda kullanılan malzemeler ve termofiziksel özellikleri, infiltrasyon, havalandırma zamanı, havalandırma oranları, dersliklerin kullanım zamanı, aydınlatma ve elektrik yüklerinden kaynaklanan iç kazançlar, kişilerden kaynaklanan iç kazançlar, ısıtma ayar sıcaklığı ve nem değeridir.

#### 2.3.1. İklim bölgeleri ve temsili şehirlerin belirlenmesi (Determination of climatic zones and representative cities)

Türkiye'de mimari ve iklim ilişkisini ele alan çalışmalarda, iklim bölgeleri; genellikle sıcak-nemli, sıcak-kuru, ılıman-nemli, ılıman-kuru ve soğuk olmak üzere sınıflandırılmaktadır [54]. Birçok ülke, binalarda enerji verimliliğinin sağlanması için bina kabuğu bileşenlerinde iklimlere göre belirli standartlar getirmeyi amaçlamıştır. Bu yüzden binalarda ısıtma zamanı ya soğutma enerji gereksiniminin belirlenmesi için iklim koşullarını karakterize eden farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan birisi de derece-gün yöntemidir. Birçok ülke, kendi belirledikleri yöntemlere göre ısıtma gün derece (hdd) ve soğutma gün derecelerini (cdd) belirlemiştir. Ardından belirlenen gün derecelere göre iklim sınıfları belirlenerek bina kabuğu için standartlar geliştirilmiştir.

Türkiye'de "TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" standardında [55], ısı kaybını önlemek için derece-gün yöntemi ile yalnızca ısıtma gereksinimi dikkate alınarak 4 iklim bölgesine ayrılmıştır ve bina kabuğu için standartlar getirilmiştir. TS 825 Standardında derece-gün bölgelerine ilişkin detaylar ilgili standartta yer almamaktadır [56]. TS 825 Standardındaki 4 ısıtma derece-gün bölgesinin, Türkiye ikliminde binalarda enerji verimliliği açısından yetersiz bir sınıflandırma olduğuna yönelik yaygın bir görüş vardır [57-60]. 2013 yılında "TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" standardının revize edilerek derece gün bölgelerinin beşe çıkarılması gündeme gelse de Türkiye Cumhuriyeti Resmî Gazetesi'nde yayınlanmadığı için yürürlüğe girmemiştir [61]. Önerilen revizyonda Erzurum, Ardahan, Kars ve Ağrı şehirleri 4. bölgeden 5. bölgeye geçirilmiştir. Avrupa Birliği'nin Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (EPBD) kapsamında yapılan bir diğer çalışmada, ısıtma ve soğutma derece günleri belirlenerek Türkiye ikliminin 6 iklim bölgesine ayrılması gerektiği belirtilmiştir [62].

Daha önceki çalışmalarda görüldüğü üzere, çeşitli ısıtma ve soğutma gün derece metoduna göre Türkiye iklimi farklı sınıflandırılmaktadır. Avrupa Birliği'ne yönelik EPBD kapsamında yapılan çalışmada: 6. iklim bölgesi aşırı soğuk (Erzurum); 5. iklim bölgesi çok soğuk (Sivas); 4. iklim bölgesi ise soğuk (Ankara) olarak belirtilmektedir

**Tablo 2.** Wells-Riley parametreleri ve kabul edilen değerler (Wells-Riley parameters and accepted values)

Parametre	Birim	Değer	İlgili makaleler
Virüs İnaktivasyon Oranı ( $k$ )	1/h	0,63	[38, 39]
Virüsün Yüzeylerde Birikme Kaybı Oranı ( $\lambda_{dep}$ )	1/h	0,24	[40-44]
Kuantum Emisyon Hızı ( $Q$ )	Kuantum/h	22,6	[14, 26, 45]
Duyarlı Kişilerin Zaman Ağırlıklı Ortalama Solunum Hızı ( $Q_b$ )	$m^3/h$	0,60	[24, 46-50]
Enfekte Kişi Sayısı ( $I$ )	Kişi	1	[26, 33, 51]

[62]. 2013 yılında revize edilmesi gündeme gelen fakat yürürlüğe girmeyen 2013 TS 825 iklim sınıflandırmasında; Erzurum, Sivas ve Ankara şehirleri farklı iklim sınıflarında yer almaktadır. Ankara, bazı çalışmalarda [54, 63] ılıman iklim olarak; bazı çalışmalarda [62] ise soğuk iklim olarak belirtilmektedir.

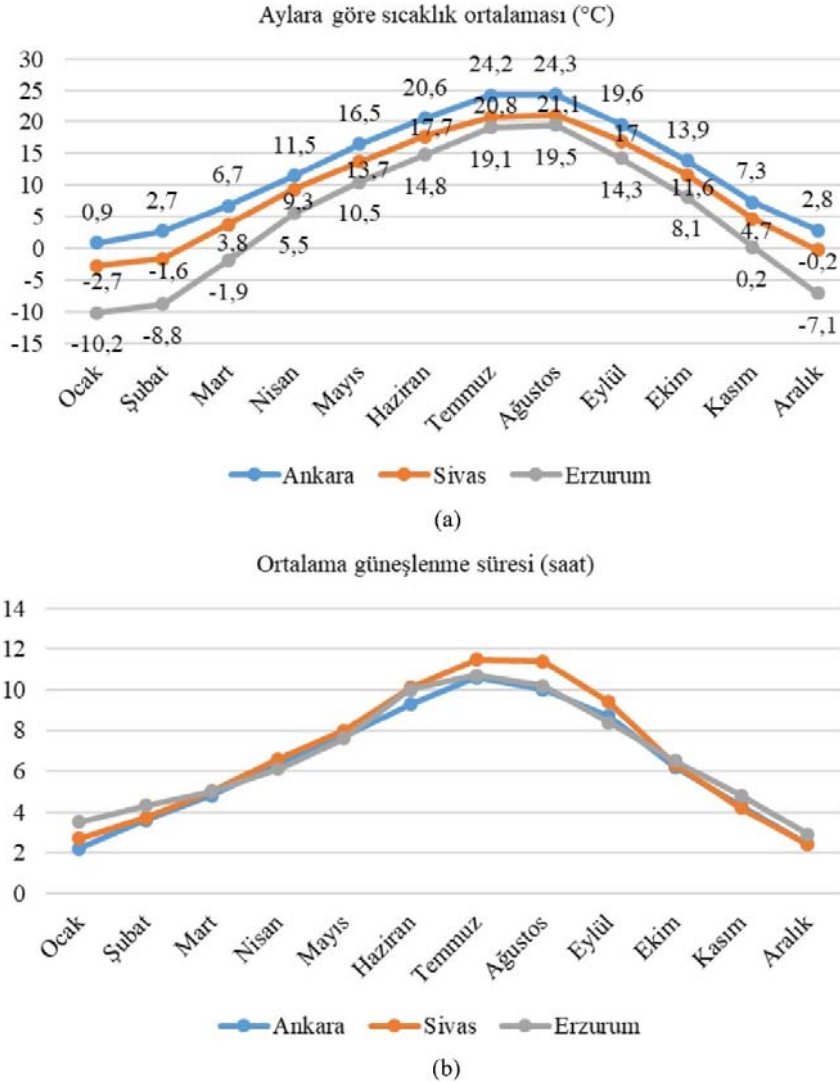
Türkiye'deki eğitim kurumları, dış hava sıcaklığının yüksek olduğu soğutma gereksiniminin olabileceği yaz aylarında tatil olması sebebiyle, mevcut çalışma ısıtma yükünün baskın olduğu iklimler üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda Türkiye'nin iklim sınıflandırmalarına yönelik çalışmalar incelenerek soğuk iklim özellikleri gösteren fakat yıllık dış sıcaklık farkından kaynaklı farklı iklim sınıfında yer alabilecek Erzurum, Sivas ve Ankara şehirleri çalışmaya dâhil edilmiştir. Bu şehirlerin ortalama sıcaklık, ortalama güneşlenme süresi, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü gibi ısıtma yükünü etkileyecek yerel hava şartları araştırılmıştır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na bağlı Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından 1991-2020 yılları arasındaki ölçümlere göre 3 şehrin aylara göre sıcaklık ortalaması ve ortalama güneşlenme süresi Şekil 2'de gösterilmiştir [64]. Rüzgâr hızı ve yönü verileri, "NASA MERRA-2 Modern-Era Retrospective Analysis" [65] veri kaynağına dayanarak

elde edilen iklim raporlarında alınmıştır [66]. Rüzgâr hızı ve yönünün aylara göre değişimi ise Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmiştir.

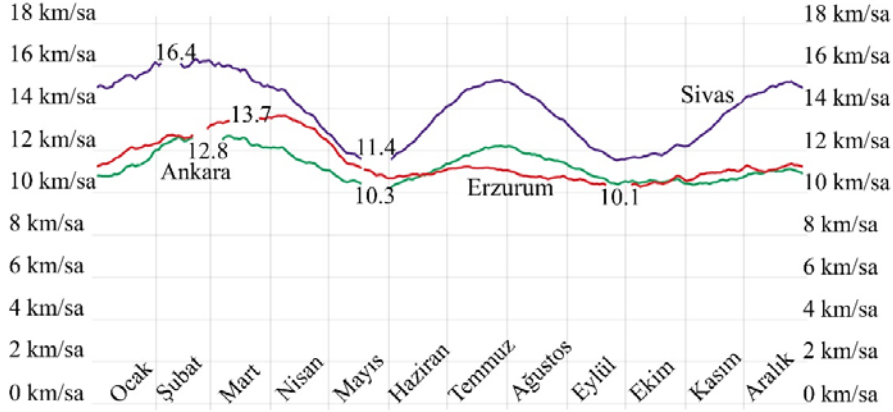
Çalışma kapsamında seçilen illerin 1991-2020 yılları arasında elde edilen verilere göre yıllık sıcaklık ortalamaları: Erzurum'da 5,3 °C; Sivas'ta 9,6 °C; Ankara'da ise 12,6 °C olarak ölçülmüştür [64]. Yıllık ortalama güneşlenme süreleri ise birbirlerine yakın olup Erzurum'da 6,7 saat; Sivas'ta 6,8 saat; Ankara'da ise 6,3 saat olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada Ankara, ılıman iklim; Sivas, soğuk iklim; Erzurum ise çok soğuk iklim olarak kabul edilmiştir. Temsili şehirlerin coğrafi konumları, iklimsel karakterleri, çeşitli çalışmalara göre iklim sınıfları ve EnergyPlus kütüphanesinde yer alan World Meteorological Organization hava istasyon numaraları ve diğer bilgiler Tablo 3'de gösterilmiştir.

### 2.3.2. Bina geometrisi ve bina kabuğuna ait genel bilgiler (General information about building geometry and building envelope)

Bina enerji simülasyonu ile ısıtma enerji yüklerinin hesaplanacağı Mimarlık Bölümü Derslik Bloğu, 44,7 m × 18,85 m boyutlarında olup 3 katlıdır. Derslik bloğu; mimari stüdyo dersliği, büyük derslik, küçük



Şekil 2. (a) Aylara göre sıcaklık ortalaması, (b) aylara göre ortalama güneşlenme süresi  
(a) Average temperature by month, (b) average sunshine duration by month)



Şekil 3. Ortalama rüzgâr hızı (average wind speed) [66]

derslik ile yatay ve düşey sirkülasyon sağlandığı koridor mekânlarından oluşmaktadır. Tüm bloklar, derslikler ve koridorların cephesi olmak üzere iki saydam cepheye sahiptir. Diğer cephelerde ise saydam bir yüzey yoktur. Açılabilen tüm pencereler tek boyutta olup 0,9 m × 1,15 m ölçülerine sahiptir. Bir katta toplamda 16 adet açılabilir pencere olup toplamda 48 adet açılabilir pencere mevcuttur. Mimari stüdyolarda 8'er adet; küçük derslikte 2'şer adet; büyük derslikte ise 3'er adet açılabilir pencere bulunmaktadır. Şekil 5'de derslik bloklarının cephesi gösterilmektedir.

Bina kabuğu tasarım parametreleri, binalardaki ısı kazanç ve kayıpları direkt etkilediği için binalardaki ısıtma-soğutma enerji yüklerini etkilemektedir [68], [69]. Bina enerji simülasyonlarında, bina kabuğundaki ısı transferi, bina kabuğu bileşenlerinin kalınlığına bağlı olarak değişebilir. Isı transferi hesaplamaları bina kabuğu bileşenleri dikkate alınarak gerçekleştirilir. Bu yüzden bina enerji modelindeki hacim ve alanlar, mevcut net alan ve hacimlerden kısmen farklılık gösterebilir. Bu çalışmada, vaka çalışması için seçilen binanın bina kabuğu bileşenlerine ve enerji analitik modeline ait genel bilgiler Tablo 4'de detaylıca verilmiştir.

### 2.3.3. Bina kabuğu bileşenleri ve termofiziksel özellikleri (Building envelope components and thermophysical properties)

İç ve dış ortamı birbirinden ayırarak kullanıcıların konfor koşullarını sağlayan bina kabuğu bileşenleri; duvar, döşeme, pencere ve çatı bileşenlerinden oluşmaktadır. Binadaki ısı kazanç ve kayıpları çoğunlukla bina kabuğundan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bina kabuğunu oluşturan bileşenlerin termofiziksel özellikleri, yapıların enerji talebini doğrudan etkilemektedir. Atatürk Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi derslikler bloğunun bina kabuğu bileşenleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bina kabuğu bileşenleri mimari uygulama projesine göre incelenmiş olup TS 825 Standardına dayanarak belirlenen termofiziksel özellikleri Tablo 5'de gösterilmiştir.

Bina kabuğu pencere doğramaları alüminyumdur. Pencere camları 6 mm cam, 12 mm hava boşluğu ve 6 mm cam olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Çalışma kapsamında pencerelerin U değeri 1,6; camların güneş ısı kazanç katsayısı (SHGC) değeri 0,56; görünür ışık geçirgenliği (VLT) değeri ise 0,79 olarak kabul edilmiştir.

### 2.3.4. Dersliklerin kullanım takvimi, dâhili ısı kazançlar ve diğer parametreler (Classroom occupancy schedule, internal heat gains and other parameters)

Üniversite binalarının yıllık ısıtma enerji yükü, eğitim öğretim yılı çalışma takviminin belirlendiği akademik takvime göre değişkenlik

gösterebilir. Bu yüzden yıllık ısıtma yükü hesaplanırken, yükseköğretim kurumlarının akademik takvimi dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013 [70], ANSI/ASHRAE 90.2-2007 [71] ve ANSI/ASHRAE 62.1-2019 [53] verilerine dayanarak üniversiteler için öngörülen akademik takvim referans alınmıştır. Buna göre 16 Aralık – 5 Ocak, 4 Nisan – 13 Nisan ve 9 Haziran – 24 Ağustos tarihleri arasında okulun tatil olduğu kabul edilmiştir. Yıllık ısıtma enerji yükü, belirlenen akademik takvime göre yalnızca okulun aktif olarak kullanıldığı dönemlere göre hesaplanmıştır. Dersliklerin kullanımı, aydınlatma kullanımı ve elektrik enerjisi kullanım zamanı yalnızca hafta içi günleriyle sınırlı tutulmuştur. ANSI/ASHRAE 55-2013 [72], ANSI/ASHRAE 62.1-2019 [53] ve ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2013 [70] standartlarına dayanılarak belirlenen iç kazançlar ve diğer simülasyon girdi verileri Tablo 6'da detaylıca gösterilmiştir.

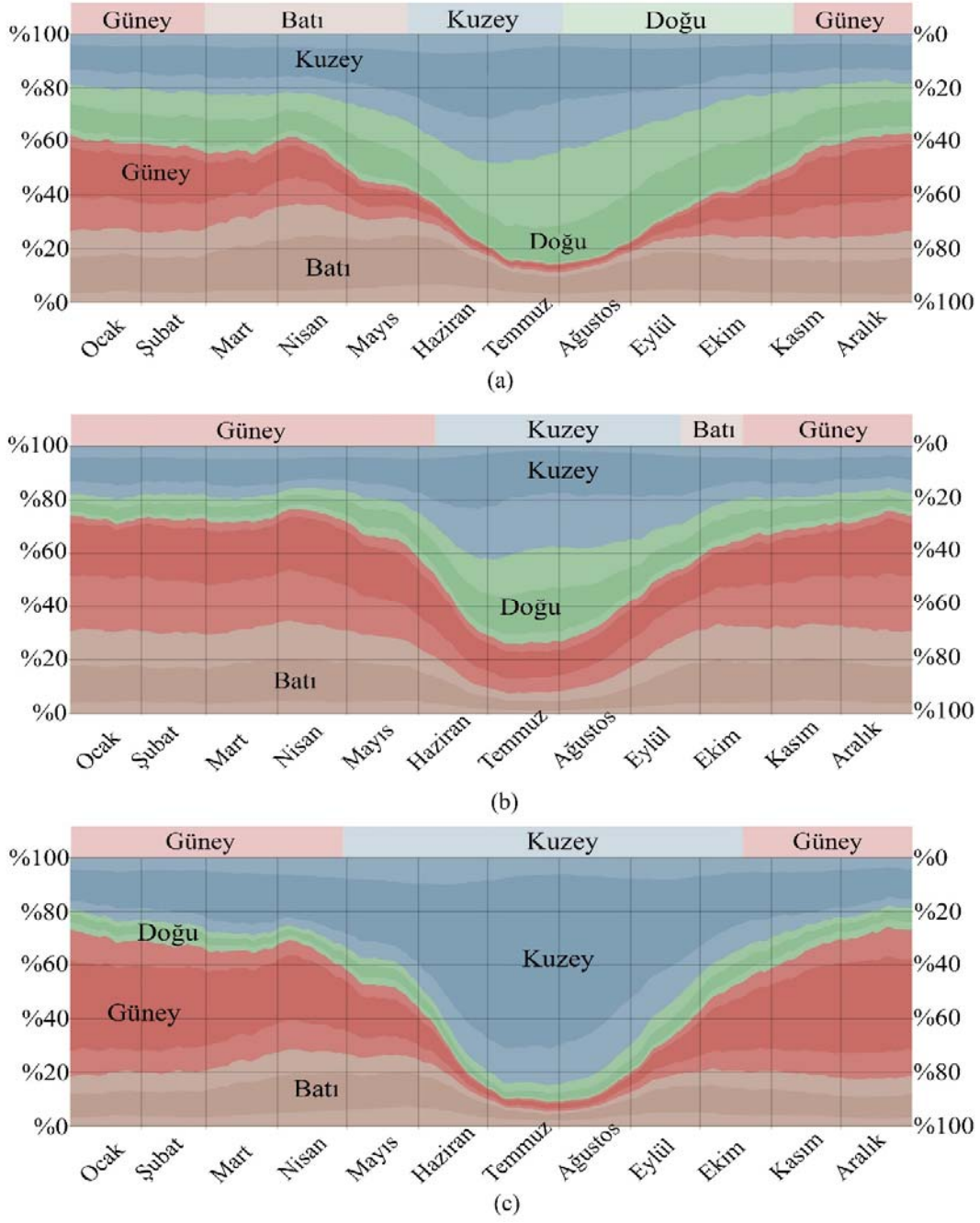
COVID-19 öncesi için havalandırma oranı ANSI/ASHRAE 62.1-2019 Standardına göre belirlenmiştir [53]. COVID-19 sonrası için havalandırma oranları ise kabul edilebilir enfeksiyon riskine göre SARS-CoV-2'ye göre uyarlanmış Wells-Riley modeliyle belirlenmiştir. Derslik bloğu koridorunda kullanıcı sayısı, kullanıcıların fiziksel aktivitesi ve sosyal mesafe kuralları sürekli değişken olduğu için koridor alanı çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

### 2.4. Isıtma Enerji Yüklerinin Hesaplanması (Calculation of Heating Energy Loads)

Bina enerji simülasyonu ile ısıtma enerji yüklerinin hesaplanması üç aşamada yapılmıştır. Öncelikle ilk adımda, mimari projeye göre Tablo 4'te belirtilen parametrelere göre derslik bloğunun fiziksel modeli ve enerji analitik modeli AUTODESK REVIT 23 yazılımı ile Şekil 7'de gösterildiği gibi üretildi.

İkinci adımda, Bölüm 2.3'te detaylı şekilde ele alınan bina enerji simülasyonu girdi verileri EnergyPlus 9.1.0 simülasyon aracına girilmiştir. Üçüncü adımda, belirlenen eğitim öğretim akademik çalışma yılına göre okulun yıllık ısıtma enerji talepleri, EnergyPlus bina enerji simülasyonu ile Tablo 3'te detayları verilen iklim verileri kullanılarak ılıman Ankara ikliminde, soğuk Sivas ikliminde ve çok soğuk Erzurum ikliminde 12 aylık dönemin 8760 saatin tamamı için ısı dengesi metoduna göre hesaplandı. EnergyPlus, ısıtma-soğutma termal yükleri hesaplarırken bina kabuğundaki geçici ısı iletimini, dış ve iç yüzeylerdeki tüm ısı dengelerini dikkate alan ısı dengesi algoritmasına göre hesaplar [73]–[75]. Isı dengesi hesaplama metodu, EnergyPlus 9.1.0 Belgelerinde [76] detaylıca açıklanmıştır. EnergyPlus yazılımının doğruluğu daha önce Building Energy Simulation Test prosedürü (BESTEST) ile doğrulanmıştır [31].





Şekil 4. Rüzgâr yönü: (a) Ankara, (b) Sivas, (c) Erzurum (Wind direction: (a) Ankara, (b) Sivas, (c) Erzurum) [66]

Tablo 3. İklim bölgeleri ve temsili şehirler (Climate zones and representative cities)

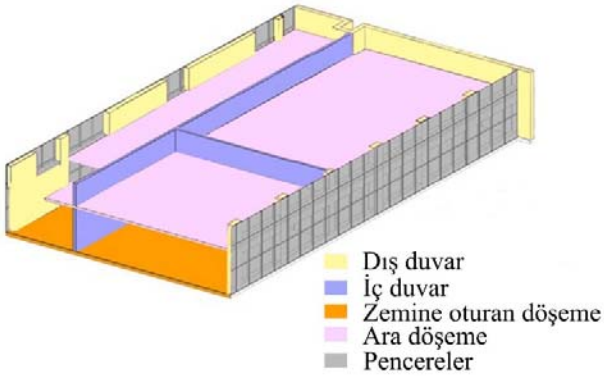
Temsili İl	WMO Hava İstasyon Numarası	Enlem (Derece)	Boylam (Derece)	Köppen İklim Sınıflandırması [67]	ASHRAE İklim Sınıfı [63]	TS 825 İklim Sınıfı [55]	Revize TS 825 İklim Sınıfı [61]	EPBD Kapsamında Önerilen İklim Sınıfı [62]
Ankara	171310	39.93	32.75	Kışları ılık, yazı çok sıcak ve kurak	4A	3	3	Soğuk (4. Bölge)
Sivas	170900	39.75	37.02	Kışı şiddetli, yazı kurak ve sıcak	5A	4	4	Çok Soğuk (5. Bölge)
Erzurum	170960	39.95	41.17	Kışı şiddetli yazı kurak ve sıcak	6A	4	5	Aşırı Soğuk (6. Bölge)



**Şekil 5.** Bina cephesi: (a) Doğu-Batı cephesi, (b) derslik cephesi (Kuzey), (c) koridor cephesi (Güney)  
(Building façade: (a) East-West façade, (b) classroom façade (North), (c) corridor façade (South))

**Tablo 4.** Bina kabuğu bileşenleri ve enerji analitik modeline ait bilgiler  
(Properties of the building envelope components and energy analytical model)

Bina Formu	Toplam kat alanı	2527,78 m <sup>2</sup> (44,7 m x 18,85 m)
	Bina en boy oranı	2,37
	Kat sayısı	3
	Pencere düzeni (Pencere duvar oranı)	Güney: 44,89%, Doğu: 0%, Kuzey: 56,25%, Batı: 0% Ortalama: 35,04%
	Döşemeden döşemeye yükseklik	4,5 m
	Döşemeden asma tavana yükseklik	3,5 m
Enerji Modeli Analitik Alan	Pencere eşik yüksekliği	0,6 m
	Toplam brüt Alan	4096,45 m <sup>2</sup>
	Isıtılan derslik brüt alanı	1694,20 m <sup>2</sup>
	Isıtılmayan koridor brüt alanı	707,45 m <sup>2</sup>
Enerji Modeli Analitik Hacim	Isıtılmayan asma tavan brüt alanı	1694,80 m <sup>2</sup>
	Toplam hacim	10110,68 m <sup>3</sup>
	Isıtılan toplam derslik hacmi	5761,71 m <sup>3</sup>
	Isıtılmayan koridor hacmi	3086,01 m <sup>3</sup>
Derslik cephe yüzey alanı (Kuzey)	Isıtılmayan asma tavan hacmi	1262,96 m <sup>3</sup>
	Brüt duvar alanı	547,39 m <sup>2</sup>
	Isıtılan brüt duvar alanı	451,83 m <sup>2</sup>
	Pencere açıklık alanı	297,64 m <sup>2</sup>
	Açılabilir pencere açıklık alanı	49,68 m <sup>2</sup>
Koridor cephe yüzey alanı (Güney)	Isıtılan pencere duvar oranı	%68,15
	Brüt duvar alanı	573,51 m <sup>2</sup>
	Isıtılan brüt duvar alanı	0,00 m <sup>2</sup>
	Pencere açıklık alanı	257,43 m <sup>2</sup>
Diğer cepheler yüzey alanı (Doğu ve Batı)	Isıtılan pencere duvar oranı	%44,89
	Doğu cephesi brüt duvar alanı	247,37 m <sup>2</sup>
	Doğu cephesi ısıtılan brüt duvar alanı	135,78 m <sup>2</sup>
	Batı cephesi brüt duvar alanı	245,35 m <sup>2</sup>
	Batı cephesi ısıtılan brüt duvar alanı	132,58 m <sup>2</sup>
	Pencere açıklık alanı	0,00
Çatı yüzey alanı	Isıtılan pencere duvar oranı	%0,00
	Isıtılan çatı alanı	795,69 m <sup>2</sup>



**Şekil 6.** Bina kabuğu bileşenleri (Building envelope components)

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

#### 3.1. Havalandırma Oranı, Enfeksiyon Olasılığı ve Yeni Vaka Sayısı Değerlendirmesi (Evaluation of Ventilation Rate, Probability of Infection and Number of New Cases)

COVID-19 öncesi ve COVID-19 koşulları için dersliklerin 4 saat kullanımı sonunda (08:00-12:00 veya 13:00-17:00 arasında), gereken havalandırma oranı, enfeksiyon olasılığı ve yeni vaka sayısı Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7'de görüldüğü üzere, COVID-19 sürecinde kabul edilebilir enfeksiyon riskinin sağlanması için COVID-19 öncesi havalandırma oranlarının mimari stüdyoda %52,82; büyük derslikte %52,63; küçük derslikte %45,74 oranında artması gerekmektedir. Tüm derslikler göz

**Tablo 5.** Bina kabuğu bileşenleri ve termofiziksel özellikler (Building envelope and thermophysical properties)

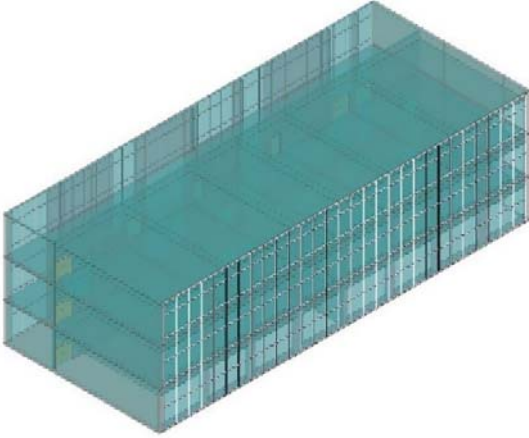
Bina Kabuğu Bileşenleri	Bina Kabuğu Malzeme Katmanı	Kalınlık (mm)	Isı İletkenlik Katsayısı ( $\lambda$ ) (W/mK)	U Değeri (W/m <sup>2</sup> K)
Dış Duvar	Taş yünü ısı yalıtımı	70	0,035	0,395
	Çimento sıva	20	1,6	
	Bims blok	300	0,6395	
	Çimento - kireç sıva	20	1,00	
	Alçı sıva (perlitli)	6	0,20	
İç Bölücü Duvar	Alçı sıva (perlitli)	6	0,20	1,713
	Çimento - kireç sıva	20	1,0	
	Tuğla	190	0,393	
	Çimento - kireç sıva	20	1,0	
	Alçı sıva (perlitli)	6	0,20	
Zemine Oturan Döşeme	Traverten döşeme kaplaması	30	2,3	0,392
	Tesviye betonu	30	1,6	
	Betonarme döşeme	150	2,5	
	Ekstrüde polistiren ısı yalıtımı	80	0,035	
	Koruma betonu	50	1,65	
	Dolgu zemin	100	0,7	
İç Döşeme	Traverten döşeme kaplaması	30	2,3	10,894
	Tesviye betonu	30	1,6	
	Betonarme döşeme	150	2,5	
Teras Çatı	Traverten döşeme kaplama	30	2,3	0,28
	Tesviye betonu	30	1,6	
	Eğim betonu	30	1,6	
	Koruma betonu	50	1,65	
	Ekstrüde polistiren ısı yalıtımı	120	0,035	
	Betonarme döşeme	150	2,5	

**Tablo 6.** Dersliklerin kullanım takvimi, aydınlatma ve dâhili kazançlar (Classroom occupancy schedule, lighting and internal gains)

Parametre	Değer
Duyulur ısı kazanımı (1 kişi)	73,27 W
Gizli ısı kazanımı (1 kişi)	58,61 W
Aydınlatma yükü	11,95 W/m <sup>2</sup>
Elektrik donanım yükü	6,89 W/m <sup>2</sup>
İnfiltrasyon	0,358 L/(s·m <sup>2</sup> )
Dersliklerin yıllık kullanım takvimi	Bahar yarıyılı: 6 Ocak – 5 Nisan ve 14 Nisan – 8 Haziran Sonbahar yarıyılı: 25 Ağustos – 15 Aralık
Dersliklerin günlük kullanımı	08:00-12:00 ve 13:00-17:00
Aydınlatma kullanımı	08:00-12:00 ve 13:00-17:00
Elektrik donanım kullanımı	08:00-12:00 ve 13:00-17:00
COVID-19 öncesi Kişi başı gerekli taze hava oranı	Mimari stüdyo: 3,8 L/s Büyük derslik: 3,8 L/s Küçük derslik: 3,8 L/s
COVID-19 Sonrası enfeksiyon riski Kişi başı gerekli taze hava oranı	Mimari stüdyo: 11,66 L/s Büyük derslik: 11,56 L/s Küçük derslik: 11,31 L/s
Isıtma ayar noktası	20,00 °C
Nem ayar noktası	40,00%
Nem alma ayar noktası	70,00%

önüne alındığında kabul edilebilir enfeksiyon riski için gereken havalandırma oranı artış oranı ortalama %51,41 olarak gerçekleşmektedir. COVID-19 pandemi sürecinde, önlem alınmadan COVID-19 öncesi koşullarına göre ders işlendiği takdirde, vaka sayısı dersliklere göre %167,67 ile %174,74 arasında artmaktadır. COVID-19 sürecinde tüm dersliklerde, sosyal mesafe ve enfeksiyon riskine dayalı havalandırma gerçekleştirildiği takdirde, sabah ve öğleden

sonra olmak üzere günlük COVID-19 vaka sayısı 34 kişi azalarak ortalama %63,19 azalmaktadır. Dersliklerde enfeksiyon olasılığı havalandırma oranı, duyarlı kişi sayısı ve yeni vaka sayısına bağlı değişkenlik göstermektedir. Tüm dersliklerdeki toplam vaka sayısı ve toplam duyarlı kişiler referans alındığında, bireysel COVID-19 enfeksiyon olasılığı COVID-19 öncesi döneme göre COVID-19 sürecinde ortalama %26 azalmaktadır.



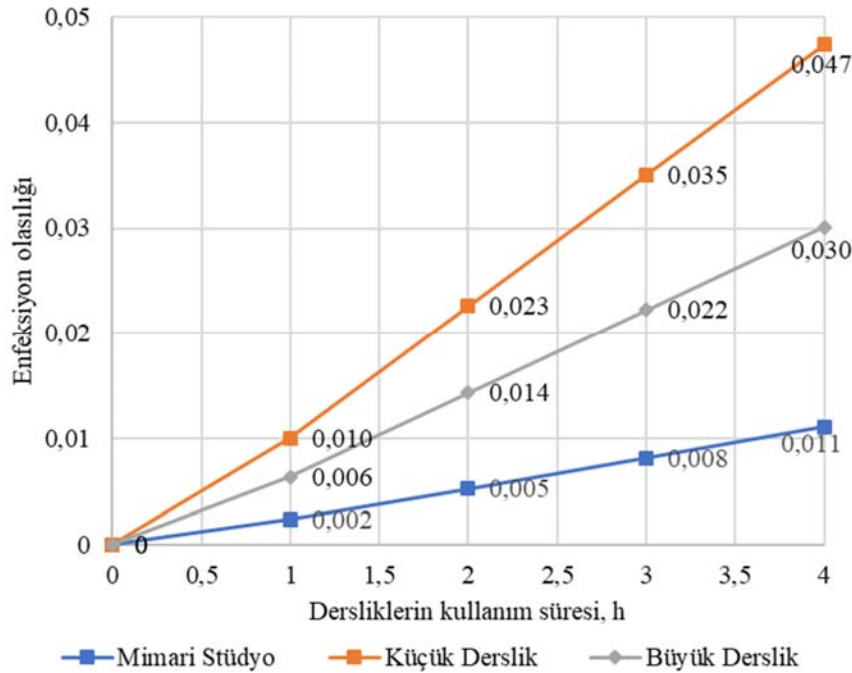
Şekil 7. Enerji analitik modeli (Energy analytical model)

Bulgular, dersliklerdeki bireysel COVID-19 enfeksiyon olasılığının küçük ve az havalandırılan dersliklere göre büyük ve iyi havalandırılan dersliklerde daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu, COVID-19 havalandırma oranı ve enfeksiyon riskine yönelik yapılan çalışmalarda olduğu gibi tutarlı ve beklenen bir bulgudur. Fakat yükseköğretim dersliklerinde ders süresine göre enfeksiyon olasılığının değerlendirilmesi, ders sürelerinin belirlenmesi ve enfeksiyon kontrolü açısından önemlidir. Bu doğrultuda COVID-19 sonrası dersliklerin sabah ya da öğleden sonra 4 saat kullanılması durumunda enfeksiyon olasılığının zamana bağlı değişimi Şekil 8’de göstermiştir.

Şekil 8’de gösterildiği gibi COVID-19 sürecinde dersliklerde 1. saatin sonunda %1 enfeksiyon olasılığı yalnızca küçük derslikte aşılmıştır. Büyük derslikte 2. saat sonunda enfeksiyon olasılığı %1 ile %2 arasında gerçekleşmiştir. Dersliklerin 3 saat kullanımı sonunda küçük derslikte enfeksiyon olasılığı %3’ü aşarken mimari stüdyoda enfeksiyon olasılığı hala %1’in altındadır. Mimari stüdyoda %1’den fazla enfeksiyon olasılığı 4. saatin sonunda gerçekleşmiştir.

**Tablo 7.** COVID-19 öncesi ve COVID-19 sonrası havalandırma oranları, enfeksiyon olasılığı ve yeni vaka sayısı (Ventilation rate, probability of infection and number of new cases before and after COVID-19)

Derslik	COVID-19 Öncesi Senaryo			COVID-19 Sonrası Senaryo				
	Virüse Duyarlı Kişi Sayısı	Havalandırma Oranı (L/s m <sup>2</sup> )	Enfeksiyon Olasılığı (%)	Yeni Vaka Sayısı (Kişi Sayısı)	Virüse Duyarlı Kişi Sayısı	Havalandırma Oranı (L/s m <sup>2</sup> )	Enfeksiyon Olasılığı (%)	Yeni Vaka Sayısı (Kişi Sayısı)
Mimari Stüdyo (4 adet)	181	2,48	%1,5	2,72	90	3,79	%1,1	0,99
Büyük Derslik (4 adet)	66	2,47	%4,1	2,68	33	3,77	%3,0	0,99
Küçük Derslik (2 adet)	43	2,47	%6,2	2,65	21	3,60	%4,7	0,99
Ortalama (10 derslik)	107,4	2,47	%2,5	2,69	53,4	3,74	%1,85	0,99



Şekil 8. Dersliklerin kullanım süresine göre enfeksiyon olasılığı (Probability of infection according to classroom occupancy)



### 3.2. Bina Enerji Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Building Energy Simulation Results)

EnergyPlus'in simülasyon sonuçları analitik, karşılaştırmalı ve ampirik testlerle doğrulanmıştır [77, 78]. Fakat enerji modeli hesaplamalarında, simülasyon girdi verilerindeki belirsizliklerden kaynaklı gerçek tüketimlere kıyasla önemli sapmalar olabilmektedir. Bu yüzden COVID-19 öncesi ve COVID-19 sırasında kabul edilebilir enfeksiyon riskine dayalı havalandırma koşullarının ısıtma yüküne etkisi analiz edilmeden önce enerji modelinden elde edilen birincil enerji kullanım yoğunluğu, diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Aynı kullanımlara sahip binaların enerji performansının kıyaslanabilmesi ve değerlendirilebilmesi için enerji kullanım yoğunluğu (EUI) en çok kullanılan göstergelerden biridir [79-81]. Vaka çalışmasında ele alınan bina yükseköğretim öğretimin alanlarını temsil etmektedir. Türkiye'de yükseköğretim binalarında genellikle ısıtma için birincil enerji kaynağı doğalgaz kullanılırken; soğutma, aydınlatma ve cihazlar için ikincil enerji kaynağı elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Tüketilen birincil ve ikincil enerji miktarı doğrudan karşılaştırılmayacağı için soğutma, aydınlatma ve cihazlar için gereken enerji talebinin karşılanmasında kullanılan elektrik enerjisi birincil enerjiye dönüştürülmüştür. Nihai elektrik enerjisinin fosil kaynaklı birincil enerjiye dönüşüm katsayısı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 1,788 olarak belirlenmiştir [82].

Vaka çalışmasında ele alınan yükseköğretim dersliklerinde, COVID-19 öncesi dönem için ısıtma, soğutma, aydınlatma ve cihazlar için gereken birincil enerji kullanım yoğunluğu iklimsel koşullara göre 126,28 kWh/m<sup>2</sup> ile 143,31 kWh/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Üniversite binalarının enerji tüketimleri, farklı faaliyetlerin gerçekleştiği laboratuvar, derslikler, ofisler ve toplantı odaları gibi farklı işlevlere sahip alanları içerdiğinden enerji tüketimleri karmaşıktır ve farklılık gösterebilir [83-85]. Gui vd. [86], yükseköğretim binalarında öğretim araştırma amaçlı alanların bina enerji tüketimini diğer alanlara göre önemli oranda arttırdığını rapor etmiştir. Khoshbakht vd. [87], 185 yükseköğretim binasının 6 farklı işleve göre enerji kullanım yoğunluklarını araştırdığı çalışmada, 09:00-17:00 saatleri arasında kullanılan öğretim alanlarının enerji kullanım yoğunluğu ortalamasını 145 kWh/m<sup>2</sup> olarak rapor etmiştir. Finlandiya'da yapılan çalışmaya göre üniversitelerin ısıtma enerji tüketimi 178 kWh/m<sup>2</sup> ile 6 kWh/m<sup>2</sup> arasında; elektrik tüketimi ise 450

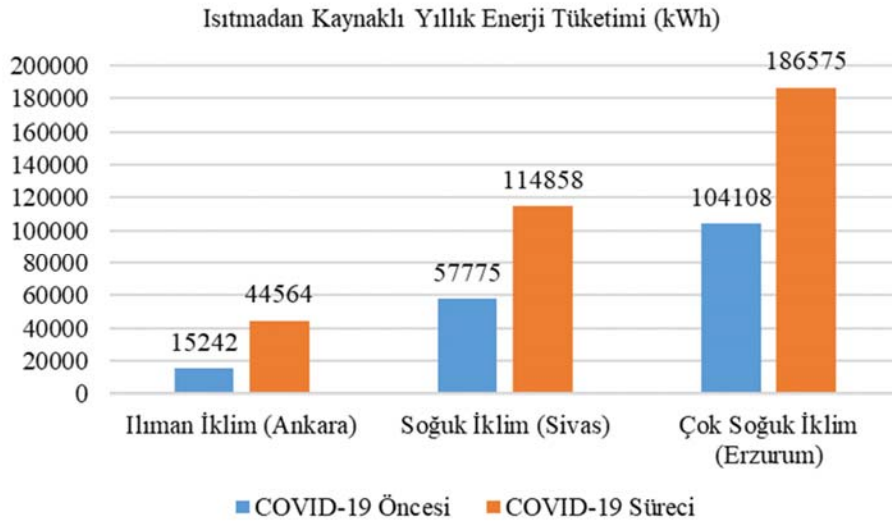
kWh/m<sup>2</sup> ile 89 kWh/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir [88]. Yunanistan'da eğitim binalarının enerji talebine yönelik bir çalışmada, eğitim binalarının birincil enerji kullanım yoğunluğunun 91,3 – 628,5 kWh/m<sup>2</sup> arasında olduğu rapor edilmiştir [89]. Avustralya'da yapılan bir çalışmada, üniversite binalarının enerji tüketiminin 46 – 551,1 kWh/m<sup>2</sup> arasında olduğu belirtilmiştir [87]. Daha önceki çalışmalardan görüldüğü üzere üniversite binalarındaki enerji kullanım değerleri belli aralıklarda gerçekleşmektedir. Bu çalışmada COVID-19 öncesi için 3 farklı iklimden elde edilen tahmini birincil enerji kullanım yoğunluğunun (126,28-143,31 kWh/m<sup>2</sup>) önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlarla tutarlı olduğu görülmektedir.

#### 3.2.1. Yıllık ısıtma enerji yüklerinin değerlendirilmesi (Evaluation of Annual Heating Energy Loads)

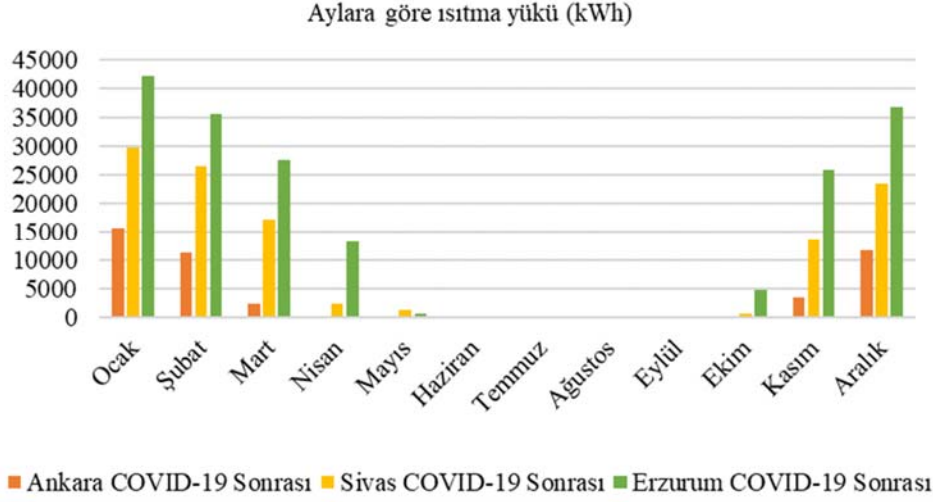
Mevcut akademik takvimde eğitim dönemi boyunca yalnızca ders saati süresince havalandırma yapılması durumunda, ılıman, serin ve soğuk iklimlerde COVID-19 öncesi ve COVID-19 sırasındaki yıllık ısıtma enerji talepleri Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekil 9'da görüldüğü üzere, COVID-19 öncesi dönemdeki havalandırma oranlarına göre yıllık ısıtma enerji yükü: Ilıman Ankara ikliminde 15242 kWh (8,99 m<sup>2</sup>/kWh); soğuk iklim Sivas'ta 57775 kWh (34,10 m<sup>2</sup>/kWh); çok soğuk iklim Erzurum'da ise 104108 kWh (61,44 m<sup>2</sup>/kWh) olarak gerçekleşmiştir. COVID-19 sürecinde kabul edilebilir enfeksiyon riski için gereken havalandırma oranlarının sağlanması durumunda yıllık ısıtma enerji yükü: Ilıman Ankara ikliminde 44564 kWh (26,30 m<sup>2</sup>/kWh); soğuk Sivas ikliminde 114858 kWh (67,79 m<sup>2</sup>/kWh); çok soğuk Erzurum ikliminde ise 186575 kWh (110,12 m<sup>2</sup>/kWh) olarak gerçekleşmektedir. COVID-19 sürecinde dersliklerde enfeksiyon kontrolü için gereken havalandırma oranları, ısıtılan dersliklerin ısıtma enerji yükünü, ılıman iklimde %192,37 (29322 kWh) artmasına; soğuk iklimde %98,80 (57083 kWh) artmasına; çok soğuk iklimde ise %79,21 (82467 kWh) artmasına sebep olmuştur.

İklimsel farklılıklar bina ısıtma enerji yüklerini önemli oranda etkilemektedir. Ankara, Sivas ve Erzurum'da yıllık ortalama güneşlenme süresi birbirine yakın olsa da yıllık ortalama sıcaklıklar arasında farklılıklar ısıtma yükleri üzerinde etkili olmuştur. Yıllık ortalama sıcaklık olarak Ankara, Sivas'tan 3 °C daha sıcakken; Sivas Erzurum'dan 4,3 °C daha sıcaktır. COVID-19 öncesi dönemde ılıman



Şekil 9. İklimlere göre COVID-19 öncesi ve COVID-19 sırasında yıllık ısıtma enerji yükleri  
(Annual heating energy loads before and in the process of COVID-19 COVID-19 by climate)



**Şekil 10.** COVID-19 sonrası aylara göre ısıtma enerji yükleri (Heating energy loads according to months after COVID-19)

iklimden soğuk iklime geçişte ısıtma enerji talebi %279,05 (42533 kWh) artarken; soğuk iklimden çok soğuk iklime geçişte %44,50 (46333 kWh) artmıştır. COVID-19 sürecinde, ılıman iklimden soğuk iklime geçişte ısıtma enerji yükü %157,73 (70294 kWh) artarken; soğuk iklimden çok soğuk iklime geçişte %62,43 (71717 kWh) artmaktadır. Sivas ve Erzurum illeri, TS 825 Standardına göre aynı iklim bölgesinde (4. bölge) yer almasına rağmen ısıtma yükleri arasındaki fark, COVID-19 öncesi 46333 kWh; COVID-19 sonrası 71717 kWh'dir. Bu durum, şu an yürürlükte olan TS 825 Standardındaki iklim sınıflandırmasının yetersiz olduğuna yönelik eleştirileri destekler niteliktedir.

Yükseköğretim öğrenme mekânlarının yıllık ısıtma enerji yükü, yıl içindeki mevsimsel şartlara göre değişkenlik göstermektedir. Isıtma yükü baskın olan ılıman, serin ve soğuk iklimde COVID-19 sonrası ısıtma enerji yüklerinin aylara göre değişimi Şekil 10'da gösterilmiştir.

Şekil 10'da görüldüğü üzere COVID-19 sürecinde en fazla ısıtma enerji yükü, ortalama sıcaklıkların en düşük olduğu aralık, ocak ve şubat aylarında gerçekleşmektedir. Aralık ayında ısıtma enerji yükü, Ankara'da 11645 kWh; Sivas'ta 23535 kWh; Erzurum'da ise 36625 kWh'tir. Ocak ayında ısıtma enerji yükü Ankara'da 15247 kWh; Sivas'ta 29872; Erzurum'da ise 42239 kWh'tir. Şubat ayında ısıtma enerji yükü Ankara'da 11.367 kWh; Sivas'ta 26.546; Erzurum'da ise 35.708 kWh'dir. Mevcut üç şehirdeki ortalama sıcaklıklar arasındaki farkın kış aylarında daha da fazladır. Bu durum ılıman iklimden çok soğuk iklime doğru kış aylarında ısıtma yükünün de daha fazla artmasına sebep olmaktadır. Ankara, Sivas ve Erzurum ikliminde COVID-19 sürecinde, haziran, temmuz, ağustos ve eylül aylarında ısıtma için enerji gereksinimi olmamıştır. Ankara ikliminde Nisan (204 kWh), Mayıs (1 kWh) ve Ekim (1kWh) aylarında ısıtma yükü ihmal edilecek kadar azdır.

Mayıs ayında COVID-19 öncesi ısıtma yükü Sivas'ta 2,12 kWh; Erzurum'da ise 3,96 kWh olarak ihmal edilecek kadar az gerçekleşmiştir. Fakat COVID-19 sürecinde artan havalandırma oranlarında ısıtma yükü Sivas'ta 1270 kWh; Erzurum'da ise 575 kWh olarak elde edilmiştir. Sivas, mayıs ayında ortalama sıcaklık olarak Erzurum'dan 3,2 °C daha sıcak olmasına rağmen COVID-19 sürecinde artan havalandırma oranları, Sivas ikliminde ısıtma yükünün daha çok artmasına sebep olmuştur. Bunun sebebi mayıs ayında gerçekleşen yerel hava şartlarının bu iki ilde farklı etki göstermesidir. Hakim rüzgâr yönü ve şiddeti gibi yerel hava şartları,

kentlerin kurulduğu bölgede doğrudan kentsel ısı dengesini bozulmasına sebep olabilir. Mayıs ayında, Sivas'ta hakim rüzgâr yönü, sıcaklığı düşürücü etkisi olan kuzey yönünden gerçekleşirken; Erzurum'da hakim rüzgâr yönü, sıcaklığı artırıcı etkisi olan güney yönünden gerçekleşmektedir. Bulgular, yerel hava koşullarının, COVID-19 gibi salgınlarda artan olağanüstü havalandırma koşullarında ısıtma yükünü daha fazla etkileyebileceğini göstermiştir.

Mevcut akademik takvim yılında, eğitim ve öğretim dönemi 9 Haziran'da bitip 24 Ağustos'ta tekrar başlamaktadır. Bulgular, COVID-19 salgınında 11 haftalık tatilin yaz ayları yerine 12 hafta olacak şekilde kış aylarında yapıldığı takdirde, yıllık ısıtma yükünün Ankara'da %86,52 (38559 kWh) oranında azaldığı, Sivas'ta %69,60 (79952 kWh) oranında azaldığı, Erzurum'da ise %61,40 (114573 kWh) oranında azaldığını göstermektedir. Bu durum doğal havalandırmaya sahip okullarda, COVID-19 salgını gibi olağanüstü durumlarda akademik takvimin yeniden ele alınmasıyla ısıtma enerji yükünün önemli oranda azalabileceğini göstermektedir.

#### 4. Simgeler (Symbols)

$Ach$	: Air change rate
$D$	: virüse maruz kalma süresi
$k$	: Virüs inaktivasyon oranı
$I$	: Enfekte kişi sayısı
$n$	: Solunan kuantum oranı
$P_I$	: Duyarlı kişilerin bireysel enfeksiyon olasılığı
$R$	: Temel üretim sayısı
$Q$	: taze hava miktarı
$Q_b$	: pulmoner ventilasyon oranı
$q$	: Kuantum oluşturma hızı
$U$	: Isı geçirgenlik katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
$V$	: Kapalı mekân hacmi
$\lambda$	: Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)
$\lambda_{dep}$	: Virüsün yüzeylerde birikme kaybı oranı

#### 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, COVID-19 pandemi koşullarında doğal havalandırmaya sahip ılıman, soğuk ve çok soğuk iklimde bulunan yükseköğretim dersliklerinde, kabul edilebilir enfeksiyon riski için gereken havalandırma oranları, bireysel enfeksiyon olasılığı, yeni vaka sayısı ve yıllık ısıtma enerji talepleri incelenmiş olup COVID-19 öncesi döneme göre karşılaştırılmıştır.

Çalışma için belirlenen yükseköğretim dersliklerinde COVID-19 pandemi sürecinde kabul edilebilir enfeksiyon riski için COVID-19 pandemi öncesine göre toplamda havalandırma oranının en az %52,20 artması gerekmektedir. Enfeksiyon riskine dayalı belirlenen havalandırma oranı, 08:00-12:00 ve 13:00-17:00 saatleri arasında işlenen derslerde, günlük yeni vaka sayısının COVID-19 öncesindeki şartlara göre 8,05'den 2,97'e düşürerek %63,10 oranında azalmasını sağlamıştır. Dersliklerdeki bireysel enfeksiyon olasılığındaki farklar, geniş ve iyi havalandırılan dersliklerde bireysel enfeksiyon olasılığının daha düşük olduğunu göstermektedir.

Enfeksiyon riskine dayalı havalandırma tasarımında, artan doğal havalandırma gereksinimi, yükseköğretim dersliklerinde yıllık ısıtma enerji talebini COVID-19 öncesi döneme göre ılıman iklimde %192,37 (29322 kWh); soğuk iklimde %98,80 (57083 kWh); çok soğuk iklimde ise %79,21 (82467 kWh) artmasına sebep olmuştur. Bulgular, mevcut dersliklerde COVID-19 sonrası gereken havalandırma oranlarının doğal havalandırma ile sağlanması durumunda sadece iklimsel koşulların farklılığından dolayı yıllık ısıtma enerji talebinin %318,66 artabileceğini göstermiştir. Bu durum, COVID-19 sürecinde eğitim-öğretim planlanması ve enerji verimliliğine yönelik stratejilerin iklimlere göre ayrıca ele alınmasının gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Türkiye'de "TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" Standardına göre Sivas ile aynı iklim sınıfında yer alan Erzurum'da, yıllık ısıtma enerji talebi Sivas'a göre COVID-19 öncesi %80,19 (46333 kWh) fazlayken COVID-19 sonrası %62,43 (71717 kWh) daha fazladır. Bu sonuçlar, TS 825 Türkiye iklim sınıflandırılmasının yetersizliğine yönelik eleştirileri destekler niteliktedir ve Türkiye'de binalarda enerji verimliliğini artırılması için TS 825 iklim sınıflandırmasının yeniden ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Doğal havalandırmanın ısıtma enerji talebine etkisi aylara göre önemli farklılıklar göstermektedir. Akademik takvimdeki yarıyıl dönemleri arasındaki 11-12 haftalık tatil, özellikle ısıtma yükü baskın olan iklimlerde, ısıtmanın gerek olmadığı yaz ayları yerine kış ayında gerçekleştirilecek şekilde planlandığı takdirde dersliklerin ısıtma enerji talebi: ılıman iklimde %86,52; soğuk iklimde %69,60; çok soğuk iklimde ise %61,40 oranında azalmaktadır. Bu yüzden COVID-19 gibi olağanüstü durumlarda akademik takvim eğitim dönemi, hem hava yoluyla enfeksiyon bulaşım azalması için hem de enerji verimliliği açısından doğal havalandırmaya uygun dönemlere göre belirlenmelidir. Pencere ile doğal havalandırma oranlarının kontrolünün zor olduğunu düşünürsek yaz aylarında aşırı havalandırmanın enerji verimliliğine olumsuz etkisi azalırken enfeksiyon riskini de düşüreceği açıktır.

Günümüzdeki birçok okulun iklimlendirme sisteminin kapasitesi, COVID-19 pandemi öncesi koşullara göre belirlendiği için COVID-19 pandemi koşullarında artan enerji talebinde yetersiz kalabilir. Ek iklimlendirme sistemleri ile artan enerji taleplerinin karşılanması maliyetli olacağı için özellikle sınırlı kaynaklara sahip ülkelerde okulun mevcut tasarım koşulları ve bulunduğu iklimsel koşullara göre enerji talebini düşürecek stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Doğal havalandırmaya sahip okullar, COVID-19 küresel pandemi sürecinde sürdürülebilir bir eğitim için hem enfeksiyon açısından güvenli olmalı hem de termal konfor açısından değişen enerji taleplerine yanıt verebilmelidir. Bu yüzden bugün ve gelecekte yaşanabilecek pandemi koşullarında, eğitimin devam edebilmesi için en azından okullardaki mevcut enerji taleplerinin gözden geçirilerek enfeksiyon riskine göre uyarlanabilen bina enerji sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Wells-Riley modeli, CFD ve bina enerji simülasyonlarının beraber kullanılmasıyla geliştirilen bir yaklaşım: bir okul binasında enfeksiyon kontrolü için gereken havalandırma oranlarının belirlenmesi, iklimlere göre mevcut tasarım koşullarında

enerji taleplerinin belirlenmesi, doğal havalandırma stratejilerinin belirlenmesi ve iç ortamdaki virüs konsantrasyon farklılıklarının mekânsal değerlendirilmesi konularını beraber ele alarak optimum çözümlerin sağlanmasına yönelik çalışmaları olanak sağlayabilir. Pencere ile sağlanan doğal havalandırmada, iç ortama sağlanan taze hava miktarı kolayca hesaplanmadığı için gerçek hayat koşullarında değerlendirilebilmesi zordur. Çünkü havalandırma oranı yerel hava şartlarına göre değişebilir. Fakat gelecekteki olası pandemilerde, açılabilir pencere koşullarına göre manuel havalandırma prosedürlerinin de belirlenebilmesi için CFD simülasyonları ve izleyici gaz yöntemi ile mevcut yöntem ayrıca geliştirilebilir ve daha kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilebilir.

## Kaynaklar (References)

1. Sönmez N., Cavka B.T., Recommendations for the transformation of patient rooms into isolated patient rooms in the process of the COVID-19 pandemic, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (1), 175-188, 2022.
2. Lipinski T., Ahmad D., Serey N., Jouhara H., Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings, International Journal of Thermofluids, 7-8, 100045, 2020.
3. de Man P., Paltansing S., Ong D. S. Y., Vaessen N., van Nielen G., Koelman J. G. M., Outbreak of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in a nursing home associated with aerosol transmission as a result of inadequate ventilation, Clinical Infectious Diseases, 73 (1), 170-171, 2021.
4. Morawska L., Tang J. W., Bahnfleth W., Blyussen P., Boerstra A., Buonanno G., ... Cao J., How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?, Environment International, 142, 105832, 2020.
5. Tang J.W., Li Y., Eames I., Chan P.K.S., Ridgway G.L., Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises, Journal of Hospital Infection, 64 (2), 100-114, 2006.
6. Wang Z., Galea E.R., Grandison A., Ewer J., Jia F., A coupled Computational Fluid Dynamics and Wells-Riley model to predict COVID-19 infection probability for passengers on long-distance trains, Safety Science, 147, 105572, 2022.
7. Franco A., Leccese F., Measurement of CO2 concentration for occupancy estimation in educational buildings with energy efficiency purposes, Journal of Building Engineering, 32, 101714, 2020.
8. European Commission, Joint Research Centre, Directorate-General for Health and Consumers, Institute for Health and Consumer Protection, Carrer P, Kefalopoulos S., Annesi-Maesano I, Rudnai P, Madureira J, ... Oliveira Fernandes E., SINPHONIE – Schools Indoor Pollution & Health Observatory Network in Europe : executive summary, Publications Office, 2014.
9. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Epidemic Task Force: Schools & Universities. <https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/ashrae-reopening-schools-and-universities-c19-guidance.pdf>. Yayın tarihi Mayıs 14, 2021. Erişim tarihi Şubat 16, 2022.
10. REHVA. How to Operate HVAC and Other Building Service Systems to Prevent the Spread of the Coronavirus (SARS-CoV-2) Disease (COVID-19) in Workplaces. [https://www.rehva.eu/fileadmin/user\\_upload/REHVA\\_COVID-19\\_guidance\\_document\\_V4.1\\_15042021.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4.1_15042021.pdf). Yayın tarihi Nisan 15, 2021. Erişim tarihi Haziran 28, 2022.
11. World Health Organization. Roadmap to Improve and Ensure Good Indoor Ventilation in the Context of COVID-19. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/339857/%209789240021280-eng.pdf?sequence=1>. Yayın Tarihi 2021. Erişim tarihi Şubat 16, 2022.
12. Allen J.G., Ibrahim A.M., Indoor air changes and potential implications for SARS-CoV-2 transmission, JAMA, 325 (20), 2112-2113, 2021.
13. Jones E., Young A., Clevenger K., vd. Risk Reduction Strategies for Reopening Schools. <https://crosscut.com/sites/default/files/files/harvard-healthy-buildings-program-covid19-risk-reduction-in-schools-nov-2020-2.pdf>. Yayın tarihi Haziran, 2020. Güncelleme tarihi Kasım, 2020. Erişim tarihi Ocak 4, 2022.
14. Dai H., Zhao B., Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. Build Simul., 13 (6), 1321-1327, 2020.

15. Hou D., Katal A., Wang L (Leon), Bayesian calibration of using CO<sub>2</sub> sensors to assess ventilation conditions and associated COVID-19 airborne aerosol transmission risk in schools. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2021.01.29.21250791v1>. Yayın tarihi Şubat 3, 2021. Erişim tarihi Mart 7, 2023.
16. Kurnitski J., Kiil M., Wargocki P., Boerstra A., Seppänen O., Olesen B., Morawska L., Respiratory infection risk-based ventilation design method. *Building and Environment*, 206, 108387, 2021.
17. Riley E. C., Murphy G., Riley R. L., Airborne spread of measles in a suburban elementary school, *American Journal of Epidemiology*, 107 (5), 421-432, 1978.
18. Zhang S., Lin Z., Dilution-based evaluation of airborne infection risk - Thorough expansion of Wells-Riley model, *Building and Environment*, 194, 107674, 2021.
19. Nazaroff W. W., Indoor aerosol science aspects of SARS-CoV-2 transmission, *Indoor Air*, 32 (1), e12970, 2022.
20. Foster A., Kinzel M., Estimating COVID-19 exposure in a classroom setting: A comparison between mathematical and numerical models, *Physics of Fluids*, 33 (2), 021904, 2021.
21. Atkinson J., Chartier Y., Pessoa-Silva C. L., Jensen P., Li Y., Seto W. H., Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings, World Health Organization, Geneva, 2009.
22. Yan Y., Li X., Shang Y., Tu J., Evaluation of airborne disease infection risks in an airliner cabin using the Lagrangian-based Wells-Riley approach, *Build Environ.*, 121, 79-92, 2017.
23. Sze To G. N., Chao C. Y. H., Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases, *Indoor Air*, 20 (1), 2-16, 2010.
24. Yılmazoğlu M. Z., Covid-19 enfeksiyon riski hesaplama aracı, *Türk Tesilat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 127, 2020.
25. Gazi Üniversitesi. Haberler - Üniversitemiz KOVID-19 Bulaşma Riskini Hesaplayan Yeni Bir Yöntem Geliştirdi. <http://gazi.edu.tr/view/news/261070/universitemiz-kovid-19-bulasma-riskini-hesaplayan-yeni-bir-yontem-gelistirdi>. Yayın tarihi Şubat 12, 2021. Erişim tarihi Ocak 31, 2023.
26. Park S., Choi Y., Song D., Kim E. K., Natural ventilation strategy and related issues to prevent coronavirus disease 2019 (COVID-19) airborne transmission in a school building, *Science of The Total Environment*, 789, 147764, 2021.
27. Ascione F., De Masi R. F., Mastellone M., Vanoli G. P., The design of safe classrooms of educational buildings for facing contagions and transmission of diseases: A novel approach combining audits, calibrated energy models, building performance (BPS) and computational fluid dynamic (CFD) simulations, *Energy and Buildings*, 230, 110533, 2021.
28. Orosa J. A., Kameni Nematchoua M., Reiter S., Air changes for healthy indoor ambiances under pandemic conditions and its energetic implications: A Galician case study, *Applied Sciences*, 10 (20), 7169, 2020.
29. Zhang X., Pellegrino F., Shen J., Copertaro B., Huang P., Kumar Saini P., Lovati M., A preliminary simulation study about the impact of COVID-19 crisis on energy demand of a building mix at a district in Sweden, *Applied Energy*, 280, 115954, 2020.
30. Yüksel A., Arıcı M., Krajčák M., Civan M., Karabay H., Energy consumption, thermal comfort, and indoor air quality in mosques: Impact of Covid-19 measures, *Journal of Cleaner Production*, 354, 131726, 2022.
31. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005 ASHRAE Handbook: Fundamentals - SI edition, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning, ASHRAE, Atlanta, Ga., 2005.
32. EnergyPlus T.M. <https://energyplus.net/>. Yayın tarihi Mart 31, 2023. Erişim tarihi Nisan 21, 2023.
33. Stabile L., Pacitto A., Mikszewski A., Morawska L., Buonanno G., Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses in classrooms, *Building and Environment*, 202, 10804, 2021.
34. Vignolo A., Gómez A. P., Draper M., Mendina M., Quantitative assessment of natural ventilation in an elementary school classroom in the context of COVID-19 and its Impact in airborne transmission, *Applied Sciences*, 12 (18), 9261, 2022.
35. Achaiah N. C., Subbarajasetty S. B., Shetty R. M., R0 and Re of COVID-19: Can we predict when the pandemic outbreak will be contained? *Indian J Crit Care Med.*, 24 (11), 1125-1127, 2020.
36. Schibuola L., Tambani C., High energy efficiency ventilation to limit COVID-19 contagion in school environments, *Energy and Buildings*, 240, 110882, 2021.
37. Gammaitoni L., Nucci M. C., Using a mathematical model to evaluate the efficacy of TB control measures, *Emerging Infectious Diseases*, 3 (3), 335-342, 1997.
38. Fears, A. C., Klimstra, W. B., Duprex, P., Hartman, A., Weaver, S. C., Plante, K. S., Roy, C. J., Persistence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Aerosol Suspensions, *Emerging Infectious Diseases*, 26 (9), 2168-2171, 2020.
39. van Doremalen N., Bushmaker T., Morris D. H., Holbrook M. G., Gamble A., Williamson B. N., ... Tamin A., Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1, *New England Journal of Medicine*, 382 (16), 1564-1567, 2020.
40. Buonanno G., Morawska L., Stabile L., Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications, *Environment International*, 145, 106112, 2020.
41. Chatoutsidou S. E., Lazaridis M., Assessment of the impact of particulate dry deposition on soiling of indoor cultural heritage objects found in churches and museums/libraries, *Journal of Cultural Heritage*, 39, 221-228, 2019.
42. Diapouli E., Chaloulakou A., Koutrakis P., Estimating the concentration of indoor particles of outdoor origin: A review, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63 (10), 1113-1129, 2013.
43. Miller S. L., Nazaroff W. W., Jimenez J. L., Boerstra A., Buonanno G., Dancer S. J., ... Kurnitski J., Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event, *Indoor Air*, 31 (2), 314-323, 2021.
44. Thatcher T. L., Lai A. C. K., Moreno-Jackson R., Sextro R. G., Nazaroff W. W., Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors, *Atmospheric Environment*, 36 (11), 1811-1819, 2002.
45. Buonanno G., Stabile L., Morawska L., Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment, *Environment International*, 141, 105794, 2020.
46. Adams W. C., California Environmental Protection Agency Air Resources Board Research Division, University of California, Davis Human Performance Laboratory, Measurement of Breathing Rate and Volume in Routinely Performed Daily Activities: Final Report, Contract No. A033-205, California Environmental Protection Agency Air Resources Board Research Division, Sacramento, 1993.
47. Binazzi B., Lanini B., Bianchi R., Romagnoli I., Nerini M., Gigliotti F., ... Duranti R., Breathing pattern and kinematics in normal subjects during speech, singing and loud whispering, *Acta Physiologica*, 186 (3), 233-246, 2006.
48. Chen S. C., Chang C. F., Liao C. M., Predictive models of control strategies involved in containing indoor airborne infections. *Indoor Air*, 16 (6), 469-481, 2006.
49. Gao C.X., Li Y., Wei J., Cotton S., Hamilton M., Wang L., Cowling B. J., Multi-route respiratory infection: When a transmission route may dominate, *Sci Total Environ.*, 752, 141856, 2021.
50. Stephens B. HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases. National Air Filtration Association (NAFA) Foundation Report. [https://www.built-envi.com/publications/nafa\\_iit\\_wellsriley%20-%20FINAL.pdf](https://www.built-envi.com/publications/nafa_iit_wellsriley%20-%20FINAL.pdf). Yayın tarihi Mart, 2013. Erişim tarihi Nisan 30, 2022.
51. Guo M., Xu P., Xiao T., He R., Dai M., Miller S. L., Review and comparison of HVAC operation guidelines in different countries during the COVID-19 pandemic, *Building and Environment*, 187, 107368, 2021.
52. Lyngse F. P., Kirkeby C. T., Denwood M., Christiansen L. E., Mølbak K., Møller C. H., ... Skov R. L., Household transmission of SARS-CoV-2 Omicron variant of concern subvariants BA.1 and BA.2 in Denmark, *Nat Commun.*, 13 (1), 5760, 2022.
53. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Standard 62.1-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 2019.
54. Ovalı P.K., Biyoklimatik tasarım matrisi (TÜRKİYE), Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20 (2), 51-66, 2020.
55. Türk Standardı TSE 825, Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
56. Pusa S., Ekmekci I., A study on degree-day regions of Turkey, *Energy Efficiency*. 9 (2), 525-532, 2016.
57. Aktacı M. A., Büyükalaca O., Yılmaz T., A case study for influence of building thermal insulation on cooling load and air-conditioning system in the hot and humid regions, *Applied Energy*, 87 (2), 599-607, 2010.
58. Ecevit A., Akinoglu B. G., Aksoy B., Generation of a typical meteorological year using sunshine duration data, *Energy*, 27 (10), 947-954, 2002.



59. Pusat S., Ekmekçi İ., Akkoyunlu M. T., Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey, *Renewable Energy*, 75, 144-151, 2015.
60. Yılmaz Z., Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate, *Energy and Buildings*, 39 (3), 306-316, 2007.
61. Atmaca U., TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardındaki Güncellemeler, *Tesisat Mühendisliği*, 154, 21-35, 2016.
62. Schimschar S., Boermans T., Kretschmer D., Offermann M., John A. U-Value maps Turkey: Applying the comparative methodology framework for cost-optimality in the context of the EPBD Final Report. <https://www.izoder.org.tr/dosyalar/haberler/Turkiye-U-degerleri-haritasi-raporu-2016-Ingilizce.pdf>. Yayın tarihi Ağustos 24, 2016. Erişim Tarihi Eylül 21, 2021.
63. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Standard 169-2013, Climatic data for building design standards, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, USA, 2013.
64. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Resmi İstatistikler – Analizler. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H&m=ANKARA>. Erişim tarihi Mayıs 7, 2023.
65. National Aeronautics and Space Administration. Global Modelling And Assimilation Office-MERRA-2. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>. Erişim tarihi Mayıs 11, 2023.
66. Weather Spark. Sivas, Ankara ve Erzurum Bölgesinde İklimi ve Hava Durumu. <https://tr.weatherspark.com/compare/y/100260~97345~102045/Sivas-Ankara-ve-Erzurum-Ortalama-Hava-Durumunun-Kar%C5%9F%C4%B1la%C5%9Ft%C4%B1rmas%C4%B1#Figures-WindSpeed>. Erişim tarihi Mayıs 11, 2023.
67. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. İklim Sınıflandırması. <https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx?m=ERZURUM>. Erişim tarihi Mayıs 8, 2023.
68. Parlak Arslan H., Koçlar Oral G., Sensitivity analysis of facade design parameters in residential buildings in the context of climatic design, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (3), 1769-1780, 2023.
69. Özer G., The effect of building facades window/wall ratio and window properties on energy performance, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 851-864, 2022.
70. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Standard 90.1-2013, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 2013.
71. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Standard 90.2-2007; Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta, BC, Canada, 2007.
72. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Standard 55-2013: Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 2013.
73. Buratti C., Moretti E., Belloni E., Cotana F., Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings, *Building and Environment*, 59, 482-491, 2013.
74. Eskin N., Türkmen H., Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey, *Energy and Buildings*, 40 (5), 763-773, 2008.
75. Miyazaki T., Akisawa A., Kashiwagi T., Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. *Renewable Energy*, 30 (3), 281-304, 2005.
76. University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley national laboratory. EnergyPlus engineering reference, Version 9.1.0 documentation. 2019.
77. Olsen E. L., Chen Q. (Yan), Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate, *Energy and Buildings*, 35 (6), 560-571, 2003.
78. Witte M. J., Henninger R. H., Glazer J., Testing and Validation of a New Building Energy Simulation Program, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro–Brazil, 353-360, 13-15 Ağustos, 2001.
79. Arjunan P., Poola K., Miller C., EnergyStar++: Towards more accurate and explanatory building energy benchmarking, *Applied Energy*, 276, 115413, 2020.
80. Chung W., Review of building energy-use performance benchmarking methodologies, *Applied Energy*, 88 (5), 1470-1479, 2011.
81. Litardo J., Hidalgo-Leon R., Soriano G., Energy Performance and Benchmarking for University Classrooms in Hot and Humid Climates, *Energies*, 14 (21), 7013, 2021.
82. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü-Elektrik Enerjisinin Birincil Enerji ve Sera Gazı Salımı Katsayıları. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/icerikler/elektrik-enerjisinin-birincil-enerji-ve-sera-gazi-salimi-katsayilari-agustos-2022den-sonra-20220825085911.pdf>. Yayın tarihi Ağustos 23, 2022. Erişim tarihi Ekim 19, 2022.
83. Gui X., Gou Z., Zhang F., Yu R., The impact of COVID-19 on higher education building energy use and implications for future education building energy studies, *Energy and Buildings*, 251, 111346, 2021.
84. Gul M. S., Patidar S., Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building, *Energy and Buildings*, 87, 155-165, 2015.
85. Klein-Banai C., Theis T. L., Quantitative analysis of factors affecting greenhouse gas emissions at institutions of higher education, *Journal of Cleaner Production*, 48, 29-38, 2013.
86. Gui X., Gou Z., Zhang F., The relationship between energy use and space use of higher educational buildings in subtropical Australia, *Energy and Buildings*, 211, 109799, 2020.
87. Khoshbakht M., Gou Z., Dupre K., Energy use characteristics and benchmarking for higher education buildings, *Energy and Buildings*, 164, 61-76, 2018.
88. Sekki T., Airaksinen M., Saari A., Measured energy consumption of educational buildings in a Finnish city, *Energy and Buildings*, 87, 105-115, 2015.
89. Katsaprakakis D. Al., Zidianakis G., Upgrading Energy Efficiency For School Buildings In Greece, *Procedia Environmental Sciences*, 38, 248-255, 2017.

