

Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği

Cemre YILDIZ^{1*} 

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 07/05/2023
Düzeltilme: 04/07/2023
Kabul: 14/07/2023

Anahtar Kelimeler

Enerji Verimliliği
Türk Enerji Verimliliği
Politikaları
Enerji Depolama
Enerji Yoğunluğu
Binalarda Enerji
Verimliliği

Article Info

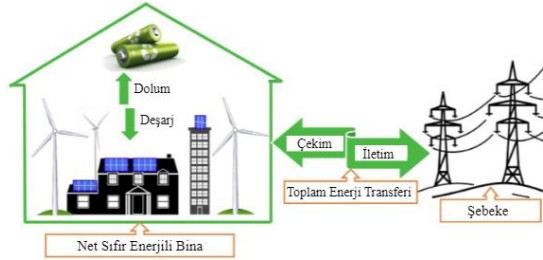
Review article
Received: 07/05/2023
Revision: 04/07/2023
Accepted: 14/07/2023

Keywords

Energy Efficiency
Turkish Energy Efficiency
Policies
Energy Storage
Energy Density
Energy Efficient Buildings

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan konut sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmalarıyla ilgili yerli ve yabancı kaynaklar taranarak olası çözüm önerileri aktarılmıştır. Sonuç olarak Türkiye’de, geniş ölçekli bir yenileme hareketi ile önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği tespit edilmiştir. / In this study, local and foreign sources regarding current energy efficiency studies in the housing sector, which is one of the main responsible for global energy consumption and carbon emissions, were scanned and solution suggestions were presented. As a result, it is shared that significant amounts of energy savings can be achieved in Türkiye with a large-scale renewal movement.



Şekil A Hibrit PV-Rüzgâr-BS tabanlı NZEB'lerin blok diyagramı /Figure A: Block diagram of hybrid PV-Wind-BS based NZEBs.

Önemli noktalar (Highlights)

- Tüm yaşam döngüsü boyunca (inşa, işletme, yıkım) yoğun miktarda enerjinin tüketildiği konutlarda, yapılacak yatırımlar ile hızlı ve yüksek verim artışlarının yakalanabileceği görülmektedir. / It is seen that rapid and high efficiency increases can be achieved with investments in residences where a large amount of energy is consumed throughout the entire life cycle (construction, operation, demolition).
- Enerji verimliliği çalışmalarında gerçeğe en yakın projeksiyon ancak verinin doğru kaynaktan belirli bir süreklilik içerisinde toplanmasıyla oluşturulabilmektedir. / The most accurate projection for energy efficiency studies can only be estimated by gathering information from the appropriate sources on certain basis.
- Yürütülecek çalışmaların verimli bir şekilde ilerleyebilmesi için öncelikle durum tespitinin doğru yapılması, sonrasında da ulaşılabilir gerçekçi hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir. / To ensure that the work is completed efficiently, it is essential to first assess the situation accurately and then set achievable targets.

Amaç (Aim): Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları derlenerek, binalardaki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek akademi ve özel sektör çalışanlarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır / By compiling Turkey's energy outlook and current efficiency policies, it is aimed to contribute to academic and private sector employees who will conduct studies to increase energy efficiency in buildings.

Özgünlük (Originality): Küresel enerji tüketimine bağlı olarak giderek artan çevresel sorunlarda önemli payı olan konut sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmaları, yerli ve yabancı kaynaklar taranarak belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmeye çalışılmıştır. / Current energy efficiency studies in the housing sector, which has a significant share in the increasing environmental problems due to global energy consumption, have been tried to be brought together in a certain order by scanning domestic and foreign sources.

Bulgular (Results): Türkiye'deki toplam tüketimin yaklaşık %48'nin binalarda tüketildiği ortaya çıkmaktadır. / It has been determined that buildings consume around 48% of overall consumption in Türkiye.

Sonuç (Conclusion): Yapı stoğunun %62,8'i ilgili (5627) yönetmeliklerden öncesine ait olan Türkiye'de, geniş ölçekli bir yenileme hareketi ile yıllık 7 milyar doların üzerinde bir tutarın boşa harcanmasının önüne geçilebileceği tespit edilmiştir. / It has been calculated that a large-scale restoration initiative in Türkiye, where 62,8% of the building stock belongs before the relevant legislation (5627), can avert an annual waste of more than \$7 billion dollars.



Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği

Cemre YILDIZ^{1*}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak Kampüsü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/05/2023
Düzeltilme: 04/07/2023
Kabul: 14/07/2023

Anahtar Kelimeler

Enerji Verimliliği
Türk Enerji Verimliliği
Politikaları
Enerji Depolama
Enerji Yoğunluğu
Binalarda Enerji
Verimliliği

Öz

2021 yılındaki ortalama küresel sıcaklık değerinin, sanayi devrimi öncesi döneme göre üst üste yedinci kez (2015–2021) 1°C'nin üzerinde seyretmesi, artış miktarının 1,5°C'de tutulması gerektiğini nedenleriyle ortaya koyan Paris Anlaşması'nın önemini artırmaktadır. Anlaşma ile belirlenen hedeflere ulaşmaya çalışan Avrupa Birliği'nde, binaların enerji tüketiminin %40'ından, sera gazı emisyonlarının ise %36'sından sorumlu olması, bu alandaki enerji verimliliği çalışmalarına hız kazandırmaktadır. Binaların yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkardıkları karbon emisyonlarının %70'inin işletme aşamasında oluşması, enerji verimliliği politikalarına temel teşkil etmektedir. Bu derlemede, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan konut sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmalarıyla ilgili yerli ve yabancı kaynaklar taranarak, ulaşılan olası çözüm önerileri başlıklar altında aktarılmıştır. Araştırmalar sonucunda, bina cephelerinde yapılacak yalıtım çalışması ile ısıtma giderlerinde %12-47, eski tip ampulleri yeni nesil LED ampuller ile yenileyerek aydınlatma kaynaklı elektrik tüketiminde %50-75, fueloil kullanan verimsiz kazanların modern biyoyakıt kazanlarıyla değiştirilmesiyle de yakıt giderlerinde %20 ile %30 arasında tasarruf sağlanabileceği tespit edilmiştir. Isı pompalarının kullanılmasıyla ısıtma giderlerinde %36, enerji depolama çözümlerinden olan termal depolamanın güneş enerjisiyle birlikte kullanılmasıyla da CO₂ emisyonlarında %21,42 düşüş saptanmıştır. Rüzgâr ve güneş enerjisinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemler elektrik giderlerinde %34 tasarruf sağlarken, yağmur suyu hasadıyla birlikte su faturalarının ortalama %45 azaltılabileceği hesaplanmaktadır. Çalışmanın devamında, Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları ile güncel konut istatistikleri derlenerek, binalardaki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek akademi ve özel sektör çalışanlarına katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Yapı stoğunun %62,8'i ilgili (5627) yönetmeliklerden öncesine ait olan Türkiye'de, geniş ölçekli bir yenileme hareketi ile yıllık 7 milyar doların üzerinde bir tutarın boşa harcanmasının önüne geçilebileceği tespit edilmiştir.

Recent Developments in Energy Efficiency of Buildings: The Case of Türkiye

Article Info

Research article
Received: 07/05/2023
Revision: 04/07/2023
Accepted: 14/07/2023

Keywords

Energy Efficiency
Turkish Energy Efficiency
Policies
Energy Storage
Energy Density
Energy Efficient Buildings

Abstract

The fact that the average global temperature in 2021 will be higher than 1 °C for the seventh time in a row (2015-2021) compared to the pre-industrial revolution period emphasizes the significance of the Paris Agreement, which clarifies why the increase should be limited to 1,5 °C. The knowledge that buildings are responsible for 40% of energy consumption and 36% of greenhouse gas emissions in the European Union, which is attempting to meet the agreement's targets, has accelerated energy efficiency research in this field. The fact that 70% of the carbon emissions created by buildings during their life cycle occur during the operation phase serves as the foundation for energy efficiency strategies. Local and international resources related to current energy efficiency studies in the housing sector, which is one of the major factors to world energy consumption and carbon emissions, are investigated in this review, and feasible alternatives are offered under each of the topics. According to the study outcomes, it is estimated that the insulation to be applied to the building facades will save between 12% and 47% in heating costs, while the saving rate of electricity consumption due to lighting will be between 50% and 75% as a result of the replacement of old-type bulbs with new-generation LED bulbs. It has been determined that replacing inefficient boilers that use fuel oil with contemporary biofuel boilers can save 20% to 30% on fuel expenses. Using heat pumps led to a 36% reduction in heating expenses and a 21,42% reduction in CO₂ emissions when solar energy was combined with thermal storage, one of the energy storage options. Hybrid systems, which combine solar and wind power, reduce electricity costs by 34%, while it has been calculated that rainwater harvesting can cut down on water expenditures by 45% on average. It has been calculated that a large-scale restoration initiative in Türkiye, where 62,8% of the building stock belongs before the relevant legislation (5627), can avert an annual waste of more than \$7 billion dollars.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapılan ölçümlere göre 2021 yılındaki ortalama küresel sıcaklığın, sanayi öncesi (1850–1900) döneme göre yaklaşık 1,11 °C daha yüksek olduğu hesaplanmaktadır. Bu durum 2021'i, ortalama sıcaklığın sanayi öncesi düzeye kıyasla 1 °C üzerinde olduğu üst üste yedinci yıl (2015–2021) yapmaktadır [1]. Etkisi giderek artan küresel ısınma ekosistem ve toplum üzerinde ciddi sorunlara neden olmaktadır [2, 3]. İklim değişikliği ve küresel ısınmanın yarattığı problemler hem Paris Anlaşması'nda hem de Glasgow İklim Anlaşması'nda [4] küresel olarak tanınmıştır; 153 ülke, Glasgow'daki COP26'da net sıfır emisyon hedefine ulaşmayı en önemli amaç olarak beyan etmiştir. Paris Anlaşması ise, ortalama küresel sıcaklık artışının sanayi öncesine göre 2 °C ile sınırlandırılmasını ve artışın 1,5 °C'de tutulabilmesi için daha fazla çaba gösterilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır [1].

Küresel iklim değişikliğinin en önemli nedenlerinden biri olarak sera gazı emisyonları gösterilmektedir [5]. Küresel karbon emisyonları 2000 yılında 25,2 milyar ton olarak hesaplanırken, bu değer 2020'de 34,8 milyar tona çıktığı görülmüştür [6]. Qian ve arkadaşları 2007'den 2035'e kadar küresel petrol tüketiminin %30, doğal gaz ve kömür tüketiminin ise %50 artacağını ve bunun sonucunda karbon emisyonunun yıllık artışının %2'den fazla olacağını belirtmektedir [7]. Ortaya çıkan çevresel etki ve risklerin başlıca nedenlerden birisi de küresel enerji tüketiminde yüksek paya sahip olan inşaat sektörüdür [8, 9].

Binalar inşa halinde, kullanımları sırasında ve ömürlerini tamamladıktan sonraki yıkım aşamaları dahil olmak üzere tüm yaşam döngüleri (life-cycle assessment) boyunca önemli miktarda enerji tüketirken aynı zamanda karbon salınımına da yol açmaktadır. Örnek olarak, İsviçre'de inşaat sektörü, toplam enerji tüketiminin yaklaşık %45'ini oluşturmaktadır. Binalarda tüketilen enerjinin çoğu fosil yakıtlardan geldiği için, İsviçre'nin CO₂ emisyonlarının yaklaşık üçte birinden bu sektör sorumludur [10]. Ayrıca konut sektörü, İsviçre'deki nihai enerjinin %27,2'sini tüketmektedir. Hanelerin nihai enerji tüketiminin yarısından fazlası petrol veya doğal gazdan kaynaklanmaktadır [11].

Avrupa Birliği (AB) yaptığı araştırma sonucunda, binaların Birliğin enerji tüketiminin %40'ından, sera gazı emisyonlarının ise %36'sından sorumlu olduğunu ortaya koymaktadır [12]. Küresel enerji kaynaklı karbon emisyonlarının yaklaşık %18'i binalarda kullanılan elektrik ve ısı üretiminden,

%9'u ise fosil yakıtların binalarda kullanılmasından kaynaklanmaktadır [13].

Enerji tüketiminin en yüksek olduğu aşamalar sırasıyla işletme ve inşaat süreçleridir. Binaların yaşam döngüsü boyunca toplam karbon emisyonları işletme sırasında kullanılan enerjiden, malzemelerin gömülü (embodied) enerjisi ve taşıma sırasında tüketilen enerjiden kaynaklanırken, bina işletme aşaması toplam karbon emisyonlarının en büyük kısmını (%70) oluşturmaktadır. Bunu taşıma (%24) ve gömülü karbon (%6) enerjisi takip etmektedir [14].

Skillington ve arkadaşları bir binanın gömülü enerjisini (EE), binanın üretim (ham madde eldesi, imalat, nakliye), inşa, yenileme veya bakım ve kullanım ömrü sonundaki yıkım aşamalarında ihtiyaç duyduğu enerjinin toplamı olarak tanımlanırken, bütün bu aşamalar boyunca ortaya çıkan emisyonlara da Gömülü Enerji Sera Gazı Emisyonları (EGHG) denmektedir [15]. Bir yapının EE enerjisinin gerçeğe en yakın şekilde tespit edilebilmesi için genellikle Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) uygulanmaktadır [16]. LCA, bir binanın yaşam döngüleri sırasında ortaya çıkardığı çevresel etkileri belirlemek için gerekli olan girdileri (su, enerji ve ham maddeler gibi) kullanarak emisyonlar ve atık gibi çıktıları sayısallaştırarak ortaya konmasını sağlar.

Önceki araştırmalara göre EE miktarının binanın yaşam döngüsü boyunca tükettiği enerjinin en fazla %10'unu oluşturduğu düşünülürken [17], son çalışmalara göre bu oranın düşük enerji tüketen yapılarda %26'yı, neredeyse sıfır enerjili binalarda (nZEB) ise %100'ü bulduğu tespit edilmiştir [18].

AB yapı stoğunun %85'i (220 milyondan fazla) 2000 yılından önce günümüze kıyasla enerji mevzuatının daha az kısıtlayıcı olduğu dönemde inşa edilmiş olup, bu yapıların %85 ila %95'nin 2050 yılına kadar kullanımda kalmaya devam edeceği öngörülmektedir [19]. AB hedeflerine ulaşmak için, 2015 seviyelerine kıyasla bina sektöründen kaynaklanan emisyonların %60, nihai enerji tüketiminin %14 ve iklimlendirme ile ilgili enerji tüketiminin ise %18 oranında azaltılması gerekmektedir [20]. AB'nin Uzun Vadeli Yenileme Stratejisi'ne (LTRS) göre [21], 2050 yılına kadar sıfır enerjili binalara geçişin tamamlanması gerekmektedir. Polonya özelinde yapılan bir çalışmada yenilenmesi gereken 14,2 milyon bina olduğu tespit edilirken, yine aynı çalışmaya göre 2020 sonrası yapılan binaların bile %30'nun termal iyileştirmeye ihtiyacı olduğu ortaya çıkmıştır [22].

Yapılan çalışmalara göre mevcut binaların yenilenmesi AB'nin toplam enerji tüketimi ve karbon emisyonlarını yaklaşık %5 oranında azaltırken, AB'deki ulusal bina stoklarının her yıl ortalama olarak %1'den azı yenilenebilmektedir [23]. 2050 hedeflerinin yakalanabilmesi için bu oranın 2030'a kadar ikiye katlanması gerektiği ifade edilmektedir [19]. İyileştirme yapılacak düşük enerji verimliliğine sahip hanelerin başarılı bir şekilde belirlenmesi, gereksiz yakıt kullanımının önüne geçilerek ülkelerin fosil yakıt tüketimlerinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır [24].

Binaların enerji verimliliği potansiyelinin gerçekçi tahmini, küresel karbon emisyonunun azaltılması ile ilgili hedeflerin yakalanabilmesini kolaylaştıracağı gibi, aynı zamanda bireysel konut sahiplerinin yapacakları yatırımların geri dönüş süresini öngörebilir hale getirecektir [25]. Hane halkının enerji tercihlerini etkileyen iki ana faktör bulunmaktadır [26–30].

- Konut tipi, var olan ısıtma sistemi ve inşaat yılı gibi konut faktörleri
- Hane halkı geliri, yaş, cinsiyet ve eğitim düzeyi gibi sosyoekonomik faktörler
- İklim yapısı gibi etkenlere göre değişen bölgesel faktörler

Bu çalışmada, küresel enerji tüketimi ve karbon salınımının başlıca sorumlularından olan konut sektöründeki güncel enerji verimliliği çalışmaları yerli ve yabancı kaynaklar taranarak belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ileriki bölümlerinde, Türkiye'nin enerji görünümü, yürürlükte olan verimlilik politikaları ile güncel konut istatistikleri derlenerek binalardaki enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalar yürütecek olan paydaşlara katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

2. BİNALARDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ (ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS)

Binaların enerji performansının iyileştirilmesi, Avrupa Komisyonu (EC) tarafından dayatılan enerji verimliliği hedeflerine ulaşmak için esas teşkil etmektedir [31]. Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD), ilk olarak 2002 yılında Avrupa Parlamentosu tarafından yürürlüğe konulmuştur. En son 2018'de revize edilen yönetmelik, Avrupa Yeşil Mutabakatı'nda (European Green Deal) belirtilen AB 2050 karbon nötr hedefleri doğrultusunda yeni yapılacak binaların verimliliğini performansa dayalı incelediği gibi, var olan yapıların da enerji

verimliliğini artıracak yöntemlerle yenilenebilmesini hedeflemektedir.

Direktif, Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileri ile Yapay Zekâ (AI) mekanizmalarını Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) sistemlerine dahil etmeyi önermektedir [32].

Enerji Tasarrufu Önlemleri (ECMs), binaların enerji kullanımını azaltmak için uygulanan her türlü teknolojik uygulama olarak tanımlanırken, üç başlık altında örneklendirilebilir [33]:

- Pasif ECM'ler (ısı yalıtımlı camların kullanılması ve harici gölge elemanlarının eklenmesi)
- Aktif ECM'ler (HVAC sistemlerinin enerji verimliliğinin artırılması ile enerji tasarruflu ampullerin tercihi)
- Yenilenebilir enerji kaynağı ECM'ler (güneş kolektörleri, fotovoltaik paneller, jeotermal ısı pompaları ve rüzgâr türbinlerinin entegrasyonu)

Pasif önlemlere örnek olarak Weglarz ve Narowski'nin meskenlerdeki termal konfor ile maliyet dengesini araştırdıkları çalışmalarında, duvarlarda 25 cm, çatıda ise 35 cm kalınlığında taş yünü ve ekstrüde polistiren (XPS) kullanılmasını önermektedir [34]. Aktif önlem olarak, Kisilewicz ve arkadaşları araştırmalarında yapılarıdaki dış duvarların önüne, içerisinde soğutucu sıvıların sirküle ettiği bir boru sistemi bulunan beton bir katman ekleyerek, dış duvarlardan kaynaklanan ısı kaybının ortalama olarak %63 azaltılabildiğini paylaşmaktadırlar [35]. Bu sistemin yeni yapıların yanı sıra, harici olarak eski yapılara da entegre edilebileceği aktarılmaktadır. Binalara yenilenebilir enerjinin entegrasyonu için de Cholewa ve arkadaşlarının dokuz apartman projesinin 20 yıllık verilerini inceledikleri çalışma gösterilebilir [36]. Çalışmalarının sonucunda, eski binalarda sıcak su eldesinde ısı pompaları kullanılarak %56,7 ile %70,5 arasında tasarruf sağlanabileceği bulunmuştur. Isı pompalarıyla PV sistemlerinin birlikte kullanılması durumunda ise maliyetlerin daha da düşürülebileceği aktarılmaktadır [37].

Binaların enerji talebini azaltabilmek adına işletme yönetimini iyileştirmeye yönelik temel eylem planları belirlenmiştir [38]. Örnek olarak, enerji denetimleri [39], enerji yönetim sistemleri [40], akıllı kontrol sistemleri ve yeşil bina sertifikaları [41] gösterilebilir. Yeşil sertifika sistemleri, yeni ve yenilenmiş binaların belirli çevre ve enerji

verimliliği standartlarını karşılandığının belgelenmesi yöntemidir.

Yeşil bina sertifikalarının en popüler örnekleri:

- İngiliz Bina Araştırmaları Kuruluşu Çevresel Değerlendirme Metodu (BREEAM)
- Amerikan Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik (LEED)
- Energy Star [42]

Bu planları bir bütünlük içerisinde sunan Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (nZEB) standardı EPBD kapsamında 31 Aralık 2018 tarihinden sonra AB ülkelerindeki tüm kamu binalarının, 2020 sonundan itibaren yapılacak yeni binaların gerekli şartları sağlamasını şart koşmaktadır [32]. Komisyon, yeni binaların enerji performansını daha da artırarak 2050 hedefleri kapsamında AB'nin karbon nötr hale gelebilmesi için Aralık 2021'de mevcut nZEB direktifini revize ederek Sıfır Emisyonlu Binalar (ZEB) planını ortaya koymuştur [43]. Plan kapsamında 1 Ocak 2030 tarihinden sonra yapılacak yeni binaların ZEB standardını karşılaması gerekmektedir.

Konutlarda enerji verimliliğini artırabilmek adına yapılan çalışmaların çıktuları incelendiğinde, karşılaşılan zorluk veya eksikliklerin genellikle yürürlükte olan yönetmeliklerin yetersizliğinden kaynaklanmadığı tespit edilmiştir [15]. Yönetmelik ve yönergelerin çoğu zaman en güncel uluslararası standartları karşıladığı, ancak çalışmaların uygulanması aşamasında; çalışmalara yeterli özenin gösterilmediği, çalışmaların sonrasında yeterince denetlenmediği, ortaya çıkan atıkların mevzuatlara göre bertaraf edilmediği ve en önemlisi uygulama sonrasında konutları kullanacak hane halkının yapılan çalışmalar hakkında yeterince bilgilendirilmediği ortaya çıkmıştır.

Blasch [44] ve Boogen [45] tarafından yapılan araştırmalar, mesken sahiplerini bilgilendirmek için yürütülen kampanyalar ile enerji sertifika programlarının, hane halkını enerjinin maliyeti hakkında bilinçlendirerek enerji tasarrufu yapmaya teşvik ettiğini ortaya çıkarmıştır.

Geçtiğimiz on yıllar boyunca yürütülen yoğun çalışmalarının ardından hane halkı, toplam enerji tüketimi ve sera gazı salınımları içerisinde önemli bir yer tutan konutlardaki enerji tüketimlerini daha verimli çözümleri tercih ederek azaltabileceklerini ve dolaylı olarak da iklim değişikliğinin önüne geçebilecekleri konusunda bilinçlendi [46]. Buna karşılık, yatırımı daha önceden yaparak baştan

itibaren yüksek enerji verimliliğine sahip binalara geçmek konusunda kararsızlık yaşanmaya devam edilmektedir. İnsanlar, enerji verimliliği potansiyeli çoğunlukla teorik hesaplamalara dayalı olan yeşil bina etiketlerini yeterince ikna edici olarak görmemektedir. Bu yapıların sahip olduğu avantajların sadece kâğıt üzerinde kalmadığını kanıtlayacak çalışmaların artması, yüksek enerji verimliliğine sahip yapıların hem inşa hem de kullanımının yaygınlaşmasını hızlandıracaktır.

Buna karşılık hane sakinleri için yeşil sertifikalı bir evde yaşamının gerçekten vaat edilen miktarda enerji tasarrufu sunup sunmadığını bilmek önemlidir. Önceki yıllarda yapılan araştırmalar, enerji verimliliği sertifikasına sahip binaların genellikle tahmin edilenden daha yüksek tüketim değerlerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır [47]. Binaların tükettiği enerjinin analiz edilerek gerçekçi tahminlerde bulunabilmek için uygulanan geleneksel araştırma metotları, mühendislik hesaplamalarını, simülasyon modellerine dayalı karşılaştırmalı değerlendirmeyi ve istatistiksel modellemelerin üretimini içermektedir [48].

Mevcut tahmin yöntemlerinin çoğu, elde edilmesi güç olan iki tür veri setine dayanmaktadır. İlk olarak, mevcut araştırmalarda, konutlarda yaşayan kişi sayısına ve tercih ettikleri ısıtma ayar sıcaklığı gibi kullanıcıya göre değişkenlik gösteren veri setleri kullanılmaktadır. Enerji tüketiminin büyük ölçüde kullanıcıların davranışlarından etkilenmesi sebebiyle, akıllı sayaçlar veya hane halkıyla yapılacak anketler değerlendirilmeden doğru veriye ulaşılması oldukça zordur. Ayrıca kiralık evlerde, kiracıların değişim sıklığı nedeniyle davranış kalıpları da değişim göstermektedir. Bu durum veri setinin güncel tutulabilmesi için sık sık anket yaptırma gerekliliğini ortaya koymaktadır. İkinci olarak, bu araştırmalar konutların neden olduğu CO₂ emisyonları ile yapının güneşlenme süresine bağlı olarak değişim gösteren duvarların güneş emilimi gibi enerji tüketimini doğrudan etkileyen göstergeleri dikkate almaktadır [49]. Bu tür verileri doğru biçimde elde edebilmenin yarattığı zorluklar ve kullanılan veri seti ile tahmin sonuç değerleri arasındaki son derece yüksek korelasyon, mevcut yöntemlerin kapsamlı enerji verimliliği tahmin çalışmaları için geniş çaplı kullanımına engel teşkil etmektedir.

2.1. Yenileme Sürecinde Karşılaşılan Zorluklar (The Challenges of a Renovation Process)

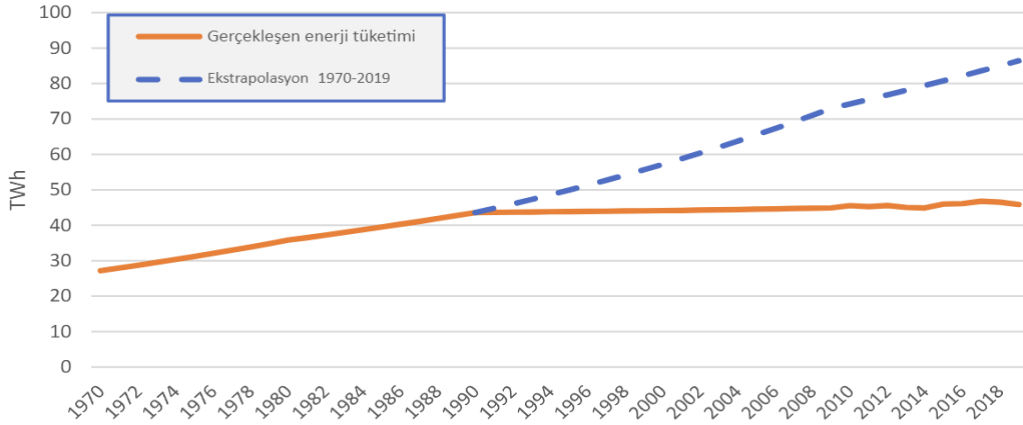
Binaların enerji verimliliğini artıracak şekilde yenilemesi teknik, ekonomik ve sosyal yönleri bir arada içerdiğinden oldukça karmaşık bir süreçtir [50, 51]. Dahası, tüm bu yenileme süreci boyunca aşılması gereken pek çok engel bulunmaktadır. Çok sayıda çalışmada, çeşitli ülkelerdeki binaların yenilenmesinde karşılaşılan engeller ve zorluklar analiz edilmiştir [52–57]. Bunlara örnek olarak Alam ve arkadaşlarının Avustralya'daki kamu binalarının yenilenmesi sırasında yaşanan zorlukları derledikleri çalışmaları gösterilebilir [52]. Karşılaşılan zorlukları Alam dört başlık altında değerlendirmektedir:

- Bilgi eksikliği (bilgi, farkındalık, beceri ve motivasyon eksikliği)
- İdari engeller (bürokratik engeller, yavaş karar alma mekanizması ve paydaşların çoğunluğunun onayının alınması)

- Sosyal engeller (çevresel etkenler ile operasyonun kesintiye uğraması)
- Mali engeller (teşvik ve kredi eksikliği, yatırım öncelikleri)

2.2. Hane Halkının Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler ve Norveç Örneği (The Factors Affecting the Household Energy Consumption and Example of Norway)

Norveç'te yapılan bir çalışmada ülkedeki hane halkı tarafından tüketilen enerjinin 1970-2019 yılları arasındaki değişimi incelenmiştir. Enerji tüketiminde, 1990'dan sonraki yıllık tüketim artışının önceki yıllara göre belirgin bir biçimde azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 1). 1970'ten 1990'a kadar olan trendin 2019'a kadar devam etmesi durumunda enerji tüketiminin 86,4 TWh olarak gerçekleşmesi öngörülmüşken, gerçekleşen sonuç 45,9 TWh olarak açıklanmaktadır. 1970 ile 1990 arasındaki yıllık artış %2,4 olurken, 1990–2019 dönemindeki yıllık artış %0,15 olarak hesaplanmaktadır [58].



Şekil 1. Norveç hane halkının 1970-2019 arasındaki öngörülen enerji tüketimi ile gerçekleşen tüketimin karşılaştırılması (Comparison of predicted and actual consumption of Norwegian households between 1970-2019) [58]

1990'a kadar olan dönemi analiz eden Hille ve arkadaşları, 1990 civarında enerji kullanımında yaşanan değişimi açıklayan en önemli faktörün kişi başına düşen mesken alanı (dwelling area) olduğunu belirtmektedir [59]. Kişi başına düşen mesken alanındaki değişimde iki faktör belirleyici görünmektedir [58]:

- Norveç'e Avrupa dışından gelen göç dalgası ile emlak fiyatlarında yaşanan yükseliş
- Yaşlanan nüfusun bir sonucu olarak insanların daha küçük konutları tercih etmeye başlamaları

Yine 2013'te yapılan bir araştırmada, Afrika, Asya ve Güney Amerika'dan gelen göçmen nüfusun kişi başına düşen yaşam alanının Norveçlilere göre %43 daha küçük olduğu tespit edilmiştir [60].

3. ISI POMPASI (HEAT PUMP)

Meskenlerdeki enerji tüketimini ve CO₂ emisyonlarını azaltmak amacıyla ısı pompası kullanımı günümüzde giderek artmaktadır. Isı pompalarının kullanımı, var olan yapıların emisyon değerlerinin azaltılmasına olanak sağlayacağı gibi aynı zamanda işletme maliyetleri de diğer ısıtma çözümlerine göre daha düşük olmaktadır [61].

Isı pompaları temel olarak: Toprak Kaynaklı Isı Pompaları (GSHP's) ve Hava Kaynaklı Isı Pompaları (ASHP's) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [62]. GSHP'ler, belirli alanlara ısı enerjisi sağlamak için arazi yüzeyinden 10-20 m derinlikten [63] sonraki kaya, toprak ve suyun sabit sıcaklığını kullanarak binalara sıcak su

sağlamaktadır [64]. Binalarda ASHP'ler tarafından sağlanan termal enerjinin kaynağı ise dış ortamdaki havanın ısısıdır [65].

Isı pompası yüksek verimli bir ısıtma ve soğutma sistemi olmasına rağmen, performansı birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ortam hava sıcaklığındaki yıllık değişim, toprak koşulları, yeraltı veya yüzey suyunun mevcudiyeti ve ulaşılabilir olması, mimari yapı, saha konumu, gürültü, alan kısıtlamaları, sermaye ve işletme limitleri gibi birçok etken sistem türünün seçiminde rol oynamaktadır [66]. Bir ısı pompası sisteminin verimi, ısı kaynağı sıcaklığı ile oda sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı düştükçe artmaktadır. Dolayısıyla ısı dağıtım elemanının sıcaklığı ne kadar düşükse ısı pompasının verimi de o kadar yüksek olmaktadır. Bu amaçla, düşük sıcaklıklı yerden ısıtma veya 55 °C su sıcaklığına sahip düşük sıcaklık radyatörlerin kullanıldığı büyük boyutlu ısı dağıtım elemanı seçmek doğru olacaktır [66].

Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmalarının sonucunda, yerden ısıtmaya sahip ısı pompalı sistemin aynı yapıda kullanılacak doğalgaz kazanlı sisteme göre işletme maliyetinde yıllık %36 tasarruf kazandırabileceği tespit edilmiştir [66]. Isı pompalı çözümlerin ilk yatırım maliyetleri geleneksel ısıtma sistemlerine göre daha yüksek olmakla birlikte, gelişen teknolojiye bağlı düşen maliyetler ile özellikle ılıman iklim bölgelerindeki kullanımını giderek artacağı öngörülmektedir.

Temel [67] ise yaptığı araştırmada hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompalarının Türkiye'nin çeşitli bölgelerindeki uygulanabilirliğini inceleyerek, örnek olarak ele aldığı villa projesindeki ısı pompalarının tasarım ve ilk yatırım maliyetlerinin hesaplarını paylaşmıştır. İlk yatırım maliyetlerinin düşüklüğü nedeniyle ısı pompaları içinde ilk tercih edilen kaynak hava olmasına rağmen, İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Güney Doğu Anadolu'nun bazı illerinde dış hava koşullarının kışın -5°C'nin altında seyretmesi nedeniyle verimin düştüğü ve ısıtma gereksinimlerini karşılamak için ek kurulum gerektiği belirlenmiştir. Bu bölgelerde toprak veya su kaynaklı ısı pompalarının tercih edilmesinin daha uygun olacağı aktarılmaktadır. Karadeniz, Marmara, Ege ve Akdeniz bölgelerinde ise soğutma ihtiyacının en az ısıtma kadar yüksek olması sebebiyle, hava kaynaklı ısı pompalarının kullanılmasının daha verimli olacağı tespit edilmiştir. Gaur ve arkadaşlarının [68] yaptıkları çalışmada da benzer sonuçlar aktarılmaktadır. Hava

kaynaklı ısı pompalarında düşük sıcaklıklarının verimi düşüreceği ve sistemin ısı yükünü karşılamada yetersiz kalacağı belirtilmektedir. Bu sebeple su toprak kaynaklı ısı pompalarının soğuk bölgeler için daha uygun seçenekler olduğu söylenmektedir. Yüksek güneş radyasyonuna sahip bölgelerde, ısı pompasının güneş enerjisi elemanları ile desteklenmesinin verimi artıracığı sonucuna varılmıştır.

4. BİNALARDA ENERJİ DEPOLAMA (ENERGY STORAGE FOR BUILDINGS)

İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında, enerji taleplerini karşılamak amacıyla hane halkının fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına (RES) yönelmeleri ve sıfır enerjili binaları tercih etmeleri teşvik edilmektedir [69]. Yeni inşa edilecek binaların yanı sıra, var olan yapı stoğuna da yenilenebilir enerji sistemleriyle birlikte enerji depolama çözümlerinin entegre edilmesi, çevresel etkilerin önüne geçebilmek adına önemli bir adım olacaktır [70].

4.1. Bataryalı Enerji Depolama (Battery Energy Storage)

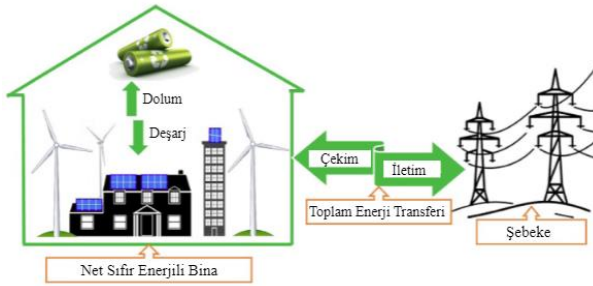
PV panellerin azalan maliyeti ve artan enerji fiyatları, elektrik faturalarını düşürmek isteyen hane halkını binalarına güneş panelleri kurmaya yöneltmektedir [71]. Binalarda güneş enerjisi parçalarının kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkan ikincil kazançlardan biri de hava şartlarına daha az maruz kaldığı için kullanım ömürleri uzayan çatı bileşenleri olmaktadır [72]. Binaya entegre fotovoltaiik sistemler, genel olarak şebekeden bağımsız (Off Grid) ve şebekeye bağlı (On Grid) olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Ayrıca, şebekeden bağımsız PV sistemleri de kendi içerisinde bataryalı ve bataryasız sistemler olmak üzere iki grupta değerlendirilebilmektedir.

Kurulum maliyetleri daha yüksek olmakla birlikte, bataryalı sistemler enerjinin ihtiyaç anında kullanılmak üzere depolanabilmesine olanak sağlarken, bu durum güneş enerjisinin doğası gereği sahip olduğu düzensiz üretim sorununa karşı bir çözüm getirmektedir [73–75]. Fotovoltaiiklerin bataryalı enerji depolama sistemleri ile kullanılması üzerine ortaya konan ekonomik analizler, genellikle son kullanıcıyı ilgilendiren konutlar üzerine yapılmaktadır [76]. Buna karşılık, kamu binaları ve ofisleri de içine alan ticari kurulumlar da son zamanlarda hızla artmaktadır [77, 78]. Güncel elektrik fiyatları göz önüne alınarak yapılan

projeksiyonlar göre, depolamalı fotovoltaik kurulumların herhangi bir ek sübvansiyon devreye alınmaksızın 7 yıldan kısa sürede kendini geri ödeyeceği belirtilmektedir [71]

4.2. Bataryalı Hibrit Enerji Üretim Sistemi (Hybrid PV-Wind-Battery Storage System)

Bir binanın en azından yıllık enerji talebi kadar üretimi kendi bünyesinde gerçekleştirebiliyor olmasına Net Sıfır Enerji (NZE) denmektedir. Bina tükettiği kadar enerjiyi üretebilmesi için öne sürülen, güneş ve rüzgâr enerjilerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemler üzerine birçok araştırma yapılmaktadır [79]. Tekil güneş ve rüzgâr kurulumları her ne kadar günümüzde yaygınlaşmış olsa da birlikte kullanılmaları halen yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Buna ek olarak, yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim modellerinde ihtiyaca göre anlık olarak şebekeye aktarım ya da şebekeden alım yapıyor olması şebeke yükümü artırmaktadır. Bu nedenle, ekonomik ve sürdürülebilir enerji üretimi için arz ve talebi tam olarak örtüşürecek biçimde RES'in optimum boyutlandırılması esastır [80, 81]. Aksi takdirde fazla ya da az üretim sonucu yaşanacak şebeke trafiği iletim hatlarında meydana gelen kayıp miktarını artırırken [82, 83], güç kalitesi ve voltaj kararlılığını da olumsuz etkileyecektir [84].



Şekil 2. Hibrit PV-Rüzgâr-BS tabanlı NZEB'lerin blok diyagramı (Block diagram of hybrid PV-Wind-BS based NZEBs) [85]

Optimizasyon sorunlarına karşın en etkili çözüm olarak bataryalı depolamanın (BS) yapıya entegresinin sağlanması ve bu sayede sistem güvenilirliği artarken, net sıfır enerjili binaların (Şekil 2) şebekeyle olan etkileşiminin azaltılabileceği aktarılmaktadır [82, 86, 87]. Çalışmalara göre, rüzgâr ve güneş sistemlerinden oluşan hibrit kurulumların tek enerji kaynağının kullanıldığı yapılara göre daha düşük kapasiteli bataryalara ihtiyaç duyduğu ortaya çıkmıştır [88, 89].

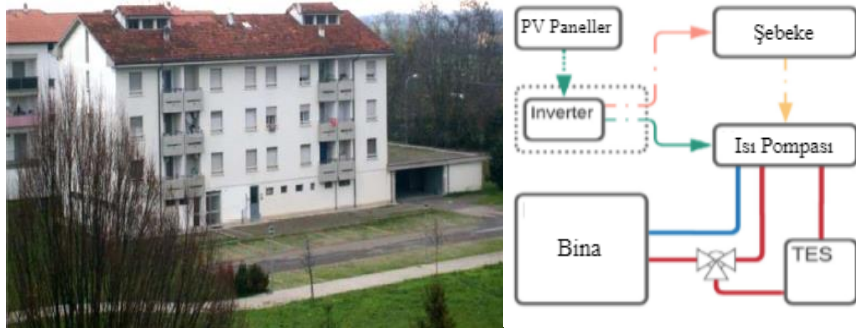
4.3. Termal Enerji Depolama (Thermal Energy Storage)

İlerleyen teknolojiyle birlikte düşen kurulum maliyetleri, enerji verimliliğini artırmak amacıyla binalarda termal enerji depolama (TES) yöntemlerinin kullanılmasını hızlandırmaktadır [90]. Enerjinin depolanması istenmesindeki en önemli etken, üretilen enerji ile tüketim değerleri arasında çeşitli nedenlerle (zaman, sıcaklık, güç farkı, lokasyon) yaşanacak uyumsuzlukların en aza indirilmek istenmesidir [91].

Gelişmekte olan diğer teknolojilerde olduğu gibi, TES'nin de kullanımının yaygınlaşması için toplum tarafından bilinirlik ve kabulünün artması gerekmektedir [92]. Enerji depolama ile elde edilecek ikincil kazançların topluma anlatılmasının bu süreci hızlandıracağı düşünülmektedir [93]. Artan sistem verimliliği sonucu elde edilecek maddi kazancın yanı sıra, düşen enerji yoğunluğunun çevre, halk sağlığı ve toplumsal ekonomik kalkınmaya olan olumlu etkileri depolama çözümlerinin kullanımını teşvik edici etmenlerdir [94]. Yapılan literatür taraması sonucunda TES kullanımının tespit edilen başlıca avantajları şunlardır [91, 95, 96]:

- Enerji sistemlerinin verimlilik ve güvenilirliğinin artırılması
- Yatırımın ve maliyetlerin azaltılması
- Kirletici emisyonların azaltılması [97, 98]
- CO₂ Emisyonlarının düşürülmesi
- İklimlendirme sistemlerine entegre kullanımda artan iç hava kalitesi
- Yeşil çatı ve cephe gibi pasif TES uygulamaları ile biyoçeşitliliğin korunması [94, 99-101]

Bunların yanı sıra, TES binaya entegre fotovoltaik sistem (BIPV) tarafından üretilen arz fazlası termal enerjiyi depolamak için de kullanılabilir. Üretim talebi karşılamadığı (akşam saatleri, kışın) anlarda ise depolanan enerji deşarj edilerek sistemin şebekeden çekeceği miktar düşürülebilir [102, 103]. Bu konuya örnek olarak Amini ve arkadaşları [70], İtalya'da 1985 yılında yapılmış bir aile apartmanının (Şekil 3a) Horizon 2020 HEART [104] projesi kapsamında 2022 yılında yenilenmesi üzerine araştırmada bulunarak, yapıya entegre edilen fotovoltaikler ile hava-su ısı pompalarının termal enerji depolama sistemleri (Şekil 3b) arasındaki uyumunu incelemişlerdir.



Şekil 3. a) İtalya'daki aile apartmanı, b) binaya entegre edilen sistemin şeması (a) Family apartment in Italy, b) diagram of the system integrated into the building) [70]

Binanın yenilenmesi aşamasında, yapıya entegre edilecek fotovoltaik sistem ile termal enerji depolama ünitelerinin yaratacağı enerji tasarrufunun CO₂ olarak eşdeğerinin tespit edilebilmesi adına, binadaki ısıtma, soğutma ve sıcak su ihtiyacının yıllık enerji tüketim verileri kullanılarak üç farklı kurulum senaryosu EnergyPlus üzerinden simüle edilmiştir.

- Senaryo 1: Bina, BIPV ve TES olmaksızın elektrik şebekesine bağlıdır.
- Senaryo 2: Yıllık tüketimi karşılamak adına binaya 10 kW BIPV kurulmuştur.
- Senaryo 3: Binaya BIPV yanında TES sistemi de eklenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, fotovoltaik sistemlerin termal depolamayla birlikte kullanıldığı üçüncü senaryonun en verimli kurulum planı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sistem ile binanın 30 yıllık kullanım ömrü boyunca toplam 34,77t CO₂ salınımının önüne geçileceği hesaplanırken, bu değer birinci senaryoda yer alan standart kurulumla göre %21,42 azalma anlamına gelmektedir. Kurulumun çevresel geri ödeme süresinin 15 yıl olacağı öngörülmektedir [70].

4.4. Hidrojen Bazlı Enerji Depolama (Hydrogen Energy Storage)

20 Kanada şehrinde yürütülen çalışmada, hidrojen bazlı enerji depolamanın binalara entegrasyonu ile sera gazı emisyonlarının azaltılması amaçlanmıştır [105]. Hesaplamalar sonucunda ortalama 122.686 Kanada doları yatırım ile yıllık ortalama 10t'nun üzerindeki CO₂'in çevreye vereceği zararın önüne geçilebileceği aktarılmaktadır. Mehrjerdi ve arkadaşlarının çalışmalarına göre ise, hidrolik güç ve güneş enerjisiyle birlikte hidrojen bazlı depolamanın kullanıldığı örnek kurulum sonucunda CO₂ emisyonlarında %50 düşüş gözlemlenmiştir [106].

Kanada'daki enerji depolama ile ilgili yaşanan zorlukların başında, ülkenin yüksek enlem bölgesinde yer almasından dolayı meydana gelen ekstrem mevsimsel düzensizlikler neticesinde yaşanabilecek belirsizliklere karşı yüksek yoğunluklu ve uzun vadeli depolamaya ihtiyaç duyulmasıdır [107]. Konutlardaki enerjinin depolanması için düşük enerji yoğunluğuna sahip bataryaların yerine, yüksek enerji yoğunluğu ve düşük sızıntı riski ile hidrojen tercih edilebilir. Ayrıca hidrojenin, evsel sıcak su veya mutfak ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla yakılarak birincil enerji kaynağı olarak da kullanılabilmesi aktarılmaktadır [108].

Güneş enerjisi ile entegre hidrojen bazlı enerji depolama sistemlerinin (SESH2ES) kullanılması, yeni inşa edilecek yapıların net sıfır emisyonlu bina (NSEB) koşullarını karşılamasına yardımcı olmaktadır [109]. Buna karşılık SESH2ES'lerin yaygınlaşmaya başlaması beraberinde depolama alanı ihtiyacıyla birlikte olası güvenlik endişelerini de artırmaktadır [110]. Özellikle entegre bir dağıtım ağına sahip olmayan bölgelerde büyük miktarda hidrojenin güvenli şekilde taşınabilmesi için sıvı organik hidrojen taşıyıcılar (LOHC) kullanılmaktadır.

LOHC'nin sahip olduğu yüksek depolama yoğunluğu ve düşük kullanım maliyetleri ile, hidrojen bazlı depolamada alternatiflerine kıyasla konutlar için daha uygun bir çözüm olduğu aktarılmaktadır [111]. Örneğin Knosala ve arkadaşları, kırsal bölgelerde yer alan binalarda LOHC'nin kullanılmasının yüksek basınçlı depolamaya göre %76-80 arasında daha ekonomik olacağını belirtmektedir [112]. Teichmann ve arkadaşları ise Bavyera bölgesinde yaptıkları örnek çalışmada, 2.000 litrelik yakıt tanklarında 3,2 MWh'lik hidrojenin depolanabileceğini tespit etmişlerdir [113].

5. NESNELERİN İNTERNETİ VE AKILLI BİNALAR (IoT AND SMART BUILDINGS)

IoT, uygun şekilde iletilen ve bulut veya mesken içi sistemler aracılığıyla işlenerek anlamlı bilgilere dönüştürülen büyük miktarda verinin toplanmasına olanak sağlar. Görselleştirilen ve AI araçları aracılığıyla analiz edilen veri setleri, toplandıkları kaynak hakkında geniş çaplı bilgi içermektedir. Kaynak sistemler hakkında alınacak kararların bu bilgi havuzuna dayandırılması, çözüm olasılıklarını artıracak gibi maliyetlerin düşürülmesi konusunda da katkı sağlayabilmektedir [114].

Akıllı bina kavramı, çevresel değişimleri anlık olarak ölçerek kullanıcıyı ve/veya ana yönetim birimini değişiklikler hakkında bilgilendiren birçok sensörün bir arada ve birbirleriyle iletişim halinde olmasına dayanmaktadır. IoT tabanlı teknolojilerinin bina sistemlerine entegre edilmeye başlanması, sağlanan düzenli veri akışı sayesinde kullanıcı alışkanlıklarının ölçülebilmesini kolaylaştırmaktadır. Toplanan verinin incelenmesi neticesinde, enerji tüketimi ve karbon ayak izi konusunda yapı bazlı tekil çözümlerin ortaya konması mümkün kılınmaktadır [115].

5.1. IoT ve Termal Konfor (IoT and Thermal Comfort)

Kullanıcıların termal konforunu olumsuz etkilemeden en az enerjinin tüketildiği sıcaklıkların tespit edilebilmesi için yapılan araştırmalar sonucunda, kamu binalarında yer alan iklimlendirme sistemlerinin iç ortam sıcaklığını kışın 17-21°C, yaz aylarında ise 26-27°C arasında tutmak üzere ayarlanmaları gerektiği tespit edilmiştir [116].

Termal konforun artırılması için yaygın olarak kullanılan yalıtım malzemeleri veya yalıtımlı camlar gibi verim artırıcı geleneksel çözümler, sahip oldukları yüksek gömülü enerji nedeniyle ön görülen miktarın üzerinde nihai tüketim maliyetlerine yol açmaktadır. Verimliliğin artırılmasına katkı sağlayan IoT ekosistemleri ise, kurulum ve operasyonel maliyetlerinin düşüklüğü nedeniyle ekonomik ve çevreci çözüm kaynakları olarak değerlendirilmektedir [116]. Binaların farklı bölgelerine yerleştirilecek sensörler üzerinden toplanacak anlık sıcaklık verileri işlenerek, gereğinden fazla ya da az ısıtılan bölgelerin tespit edilmesi kolaylaşmaktadır. Ek olarak toplanan veriler sayesinde yapılardaki olası termal izolasyon sorunları da tespit edilebilecektir.

Termal konforun sağlanabilmesi adına faydalanılan IoT sistemlerine örnek olarak Avustralya'da yapılan bir çalışma gösterilebilir. Avustralya'daki dört ofis binasına entegre edilen ortam takip sistemlerinden sağlanan veri akışı anlık olarak analiz edilerek, iklimlendirme sistemleri ofislerdeki termal konfor düzeyini çalışanların en verimli şekilde çalışmalarına olanak sağlayacak aralıkta tutmaktadır [117].

5.2. IoT ve Bina Yönetim Sistemleri (IoT and Building Management Systems)

IoT ve bina yönetim sistemleri (BMS), gelişen teknoloji ve artan kullanıcı bilinciyle birlikte popüleritesi giderek yükselen iki güncel araştırma konusudur. Günümüzde bu iki sistemin bir arada yaygın bir biçimde kullanılmasının önündeki en büyük engel olarak, son kullanıcı tarafından yüksek bulunan maliyetler gösterilmektedir [118]. Ouedraogo ve arkadaşları tarafından geliştirilen [119] ve 30\$'lık eklenti maliyeti ile binaya entegre hibrit güneş ve rüzgâr enerjisi kurulumlarının [120, 121], üretim verilerini anlık olarak cep telefonu üzerinden kontrol edilebilmesine [122] olanak sağlayan sistemin hali hazırda piyasadaki alternatiflerine göre (100\$ to 600\$) çok daha ucuz olduğu aktarılmaktadır. İçerisinde klima, buzdolabı, bulaşık ve çamaşır makinelerinin yer aldığı ve rüzgâr-güneş hibrit kurulumun gerçekleştirildiği örnek çalışma sonucunda [119]:

- Elektrik faturasında %34 azalma
- Termal konfor seviyesinde %4 artış
- Anlık tepe güç ihtiyacında %53 düşüş gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, herhangi bir güç kontrol sistemine sahip olmayan kamu binaları ve okullar gibi eski yapılara, düşük kurulum maliyetleri ile enerji yönetim sistemlerini entegre ederek enerji verimliliklerinin yükseltilebileceği anlaşılmaktadır.

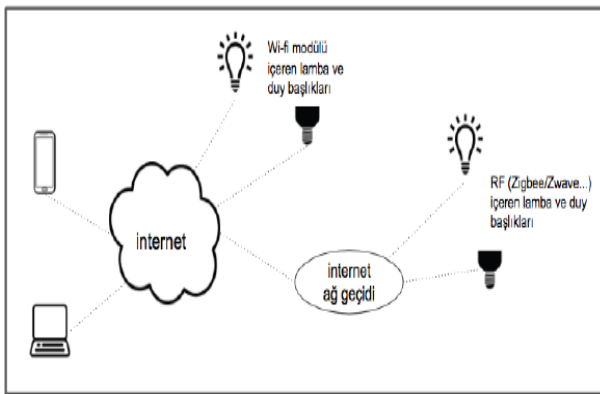
6. AYDINLATMA (LIGHTING)

Binaların elektrik tüketiminde aydınlatma sistemleri önemli bir yer tutmaktadır. Toplam elektrik enerjisinin %20-%25'i aydınlatma sektöründe kullanılmaktadır, bu değer ısıtma-soğutma sistemlerinden sonra en yüksek ikinci tüketim kalemidir [123]. Aydınlatmada enerji verimliliği uygulamaları hayata geçirilirken, kullanılan armatür sayısını azaltacak veya ışıkları kapatıp ortamın aydınlık miktarını düşürecek

yöntemlerin yerine verimlilik artırıcı çözümlerin benimsenmesi gerekmektedir. Atılacak ilk adım ortamın doğal aydınlatma potansiyelinden yararlanılması, sonrasında ise kullanılacak mekân için gerekli görülen miktarda armatürün seçilmesi tavsiye edilmektedir. Mekâna ve kullanım amacına uygun ışık rengi ve şiddetinin seçilmesi ortamda bulunanların termal konforunu [124] yükselteceği gibi, enerji verimliliğinin artması sonucunda yapılacak yatırımı ortalama olarak 2-3 yıl içinde geri ödeyecek miktarda tasarruf sağlanabilmektedir [125]. Yapılan işin gereklerine uygun aydınlatma altyapısının kurulması, çalışanların iş güvenliğini artırdığı gibi aynı zamanda iş verimine de %16 katkısı olduğu tespit edilmiştir [126]. Aydınlatma temelde, yapay ve doğal aydınlatma yöntemleri olarak iki türlü sağlanmaktadır.

6.1. Yapay Aydınlatma (Artificial Lighting)

İnsan yapımı kaynaktan beslenen yapay aydınlatmada enerji verimli uygulamalar, 1990'larda kompakt flüoresan lambaların (KFL) kullanılmasıyla başladı. Sonrasında LED ışık kaynaklarının hızla gelişmesi ve genel aydınlatmada kullanılabilir hale gelmesi ile E27 ve E14 duyu başlı LED ışık kaynakları, konutlarda KFL'lerin yerini almaya başladı. Diğer yandan, birçok alanda kullanımı giderek artan IoT'lerin aydınlatma sistemlerine entegre olmasıyla hem mevcut aydınlatma sistemleri kontrol edilebilir hale gelmiş, hem de LED teknolojisinde yaşanan teknolojik ilerlemeler ile daha fazla tasarruf imkânı yakalanmıştır [127].



Şekil 4. Konutlarda kullanılan IoT destekli aydınlatma sistemleri (IoT supported lighting systems used in residences) [127]

Akıllı aydınlatma sistemleri elektrik tasarrufu sağlamanın ötesinde, kullanıcıların talepleri doğrultusunda çeşitli aydınlık düzeyi ve renk

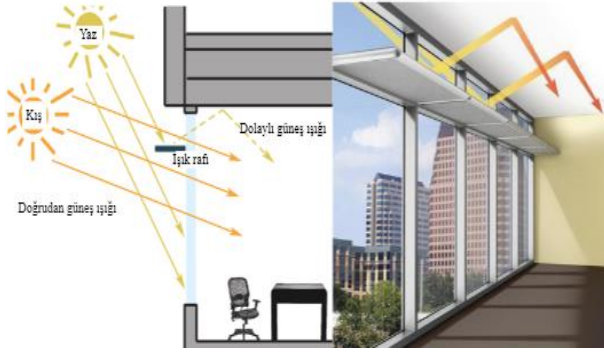
alternatiflerini kullanıma sunabilmektedir. IoT tabanlı akıllı LED lamba olarak tanımlanan ürünler genellikle 2.4 GHz bandında çalışan Zigbee kablosuz iletişim standardını kullanmaktadır [128]. IoT tabanlı aydınlatma sistemlerinin çalışma prensibi Şekil 4'te gösterilmektedir [127].

Yeni nesil LED'ler, geleneksel aydınlatma çözümlerine göre daha gelişmiş optik özelliklere sahiptir. Geleneksel armatürler ürettikleri ışığı çevrelerine 360° yaydıklarından, ihtiyaç duyulan alanın dışına aktarılan enerji aydınlatma veriminin düşmesine sebep olmaktadır. LED'ler sahip oldukları teknolojik yeterlilik ile sadece gerekli görülen yeri aydınlatarak yüksek verim sunabilmektedir [129]. LED'ler kullandıkları enerjinin %95'ini ışığa dönüştürerek floresan lambalara göre %50 enerji tasarrufu sağlamaktadır.

6.2. Doğal Aydınlatma (Natural Lighting)

Bir yapı daha tasarım aşamasındayken inşa edileceği bölgenin doğal aydınlatma özellikleri göz önünde bulundurulmalı ve güneş ışığından en yüksek verimle yararlanabilmesi için gerekli hesaplamalar yapılmalıdır. Yapının yerleşim yönü, dış cephesinin mimari tasarımı, kullanılacak pencere türü gibi bina kabuğunun güneş ışığıyla etkileşimini değiştirecek etmenler ile yapıya gelen güneş ışığının seviyesinin değiştirilebilmesini sağlayan kontrol sistemleri tasarım aşamasına dahil edilmelidir. Tüm bu parametrelere özen göstererek yapay aydınlatma ihtiyacı en aza indirebilirken aynı zamanda ekonomik kazancın yanı sıra çevrenin korunumuna da katkı sağlanabilir [130].

Doğal aydınlatmanın doğru kullanımı ile güneş ışınlarının doğrudan alınmadığı saatlerde bile ortamın aydınlatması sağlanabilir ve bu sayede gün içinde yapay aydınlatma kullanımını 6 ile 12 saat arasında düşürülebilir. Örneğin doğal aydınlatmadan yararlanan bir binada yer alan 40 W gücündeki 30 adet ampulün 12 yerine 4 saat kullanılması, yıllık enerji tüketimini yaklaşık 3.500 kWh azaltmış olacaktır [131]. Doğal aydınlatma çözümlerinde genellikle ışık rafları, yönlendirici camlar, prizmatik sistemler ve güneş gölgeleme olanağı sağlayan cephe kaplamaları kullanılmaktadır. Bu ürünler yapıya etkileyen gün ışığının istenen bölgeye yönlendirilmesine olanak sağladığı gibi, gereğinden fazla ışık alan coğrafya ya da mevsimlerde ortamın fazla ısınmasının da önüne geçmektedir.



Şekil 5. Işık Rafları (Light Shelves) [129]

Örnek olarak ışık rafları (Şekil 5), gün ışığını yönlendirerek aydınlatma sağlayan ve bu sayede verimli, doğal aydınlatma imkânı veren sistemlerdir. Işık raflarının üst yüzeyi yansıtıcı bir tabaka ile kaplanarak, gelen ışığı yatay veya açılı plakalara yönlendirecek şekilde tasarlanan elemanlardır. Pencerelemin iç veya dış yüzeyinde konumlandırılarak bilmektedirler [132]



Şekil 6. Yapıya entegre ve kontrol edilebilir ışık rafları (Integrated and controllable light shelves) [133]

Çetegen ve arkadaşları İTÜ Ayazağa Kampüsünde yaptıkları çalışmada kurulması muhtemel ışık raflarının mevsimsel enerji tasarrufunu araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, yaklaşık olarak bahar döneminde %25, kış aylarında %19,5, yazın ise %11,4 olmak üzere yıllık ortalama %20,4 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceğini belirtmişlerdir [134].

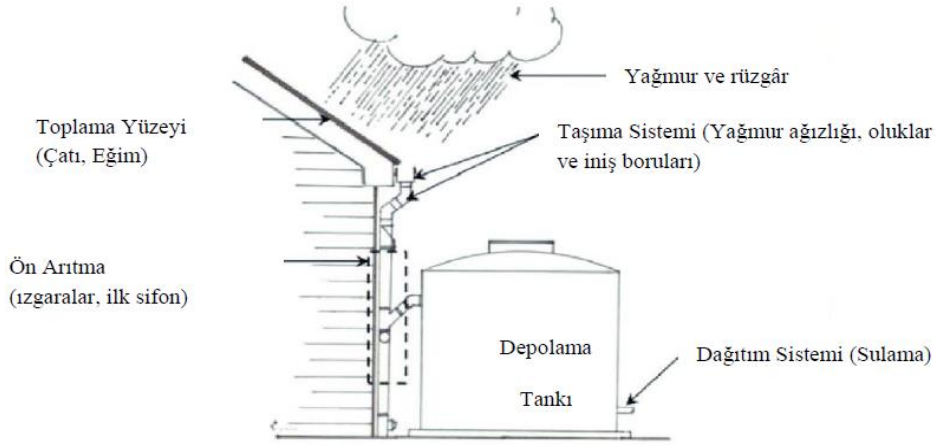
Özet olarak, aydınlatma sistemlerinin ihtiyacı karşılar nitelikte seçerken aynı zamanda mümkün olduğunca doğal aydınlatmadan yararlanılması durumunda %20 ve üzeri oranlarda tasarruf sağlayabilmek mümkün gözükmektedir. Sadece aydınlatma sistemlerinin enerji verimliliğini yükselterek Türkiye'nin toplam elektrik tüketiminin %5 azaltılabileceği hesaplanmıştır [129].

7. SU TÜKETİMİ (WATER CONSUMPTION)

Birleşmiş Milletler (UN) Dünya Su Kalkınma Raporu 2023'e göre, nüfus ve gelir değişikliklerine bağlı olarak 2050 yılına kadar su talebinde %20-30'luk bir artış olacağı öngörüldürken, aynı zamanda küresel su kaynaklarının azalması sonucunda yaklaşık 3 milyar insanın şiddetli su kıtlığı olan bir bölgede yaşayacağı aktarılıyor. Ayrıca raporda, iklim değişikliğinin su arzını, talebini ve kalitesini etkilemedeki rolü vurgulamakta [135]. Qin ve arkadaşları, günlük evsel su kullanımı ile günlük ortalama sıcaklık arasında pozitif bir ilişki olduğunu belirtiyorlar. Araştırmalarının sonucunda ortalama sıcaklıklardaki her 1°C'lik artışın, evsel su tüketimini günlük 3,3 l artıracacağı tespit edilmiştir [136].

Tatlı su kaynaklarının sınırlı olması ve temiz su elde etmenin yüksek maliyeti insanları çeşitli arayışlara yöneltmiştir. Çoğalan nüfusun su talebine karşın temiz su miktarını artırmak adına deniz suyunun arıtılması teknik açıdan mümkün olsa da ekonomik olarak geniş kitleler için uygulanabilir değildir [137-141]. Bunun yerine, düşük kurulum ve işletme maliyetleri ile binalarda toplanacak yağmur suyu evsel ihtiyaçların karşılanması için tercih edilebilir [142].

Yol, kaldırım, otopark gibi boş arazilerden ve özellikle apartman çatılarından borularla toplanan yağmur suları (Şekil 7) filtre edildikten sonra depolara alınmakta ve burada depolanan su bahçe sulama, araç yıkama, tuvalet rezervuarları ve diğer temizlik işleri için kullanılabilir [143]. Yağmur suyu hasadıyla, yağmur toplama alanının büyüklüğü ve mesken kullanıcılarının günlük tüketim talebine göre değişmekle birlikte %30-60 arasında tasarruf sağlanabileceği hesaplanmaktadır [144]. Yapının yer aldığı bölgenin iklim ve yağış karakteristikleri, su hasadında kullanılacak sistemin tasarımındaki en önemli etkidir. Bir bölgenin yağış potansiyelinin belirlenebilmesi için yağış verilerinin düzenli kaydedilmiş olması gerekmektedir [145]. Küresel iklim değişikliği nedeniyle yağış düzenlerinde değişiklikler yaşanırken, bu durum yağmur potansiyelinin gerçekçi şekilde belirlenebilmesini güçleştirmektedir [142].



Şekil 7. Yağmur Suyu Toplama Sistemlerinin Bileşenleri (Components of a rainwater harvesting system) [146]

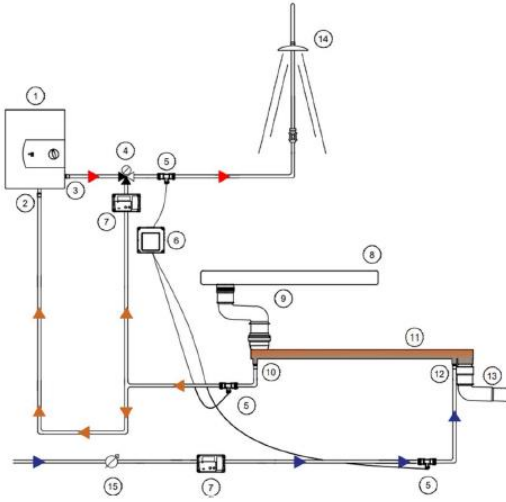
Son yıllarda etkisini artıran küresel ısınmanın kısıtlı tatlı su kaynakları üzerindeki olumsuz etkisi sebebiyle, özellikle nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu kentsel alanlarda sürdürülebilir bir su yönetiminin sağlanmasını zorunlu hale getirmektedir [147]. Su yönetiminin sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için, öncelikle su tüketiminin gerçeğe en yakın şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Halihazırda su tüketiminin ölçülmesinde yaygın olarak manuel sayaç okuma (MMR) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde genel olarak sayaçları tek tek gezerek kontrol eden görevliler bulunmaktadır, bazı durumlarda ise son kullanıcıların da sayaçlarını düzenli takip ederek yetkili kurumlara bildirmesi gerekmektedir. Geleneksel olarak kabul edilen bu yaklaşım, sadece bu işlem için görevlendirilen birçok çalışan olması sebebiyle pahalı ve idaresi karmaşık bir organizasyonu içermektedir [148].

Bununla birlikte iletişim teknolojilerinde yaşanan gelişmelere paralel olarak, birbirine entegre biçimde sensör verilerini karşılıklı olarak işleyebilen birçok cihaz IoT ekosistemine dahil olmaya başlamıştır [149]. Bu gelişim, kaydedilen verilerin gerçek zamanlı iletişimine izin veren Otomatik Sayaç Okuma (AMRs) cihazlarının yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır [150]. Bu cihazlar düşük enerji tüketimi ile uzun mesafeler arasında iletişim kurulabilmesine olanak veren düşük güçlü geniş alan ağı (LPWAs) altyapısını kullanmaktadır [151–153]. LPWA ekosistemi içerisinde ise sahip olduğu teknik avantajlar nedeniyle yaygın olarak LoRaWAN çözümü tercih edilmektedir [154]. Radyo frekansları ile veri iletimi sağlayan sistem, elektromanyetik iletimin kısıtlı olduğu ortamlarda yer alan sayaçların (örneğin yer altı bodrum katları) merkezi sisteme bilgi iletebilmesini mümkün kılmaktadır.

LoRaWAN iletişiminin uzun menzilli iletişimi, 1 GHz'in altındaki frekans bandında çalışan chirp yayılma spektrumu (CSS) modülasyon tekniğine dayanmaktadır [155, 156]. Sadece verinin iletileceği anlarda sistemi aktif hale getiren teknoloji, pilli bataryaya sahip sayaçların herhangi bir bakım gerektirmeden uzun süre aktif olarak kullanılmasına izin vermektedir.

Giderek yaygınlaşan akıllı binaların su tüketimi alanındaki bir diğer getirisi, akıllı su yönetimi sayesinde boru arızalarının zamanında ve hızlı tespit edilmesini kolaylaştırarak olası kaçakların önüne geçilebilmesini sağlamasıdır. Akıllı su sayaçları, su tüketim verilerini depolayarak olası boru arızaları hakkında yapay zekâ yardımıyla sonuca varabilmektedir. Sistem tarafından algılanan arıza, web uygulaması aracılığıyla olası bir su sızıntısı hakkında kullanıcıya veya sisteme alarm göndermektedir. Ayrıca makine öğrenmesi yoluyla merkezi idare sistemi kullanıcı alışkanlıklarını takip ederek son kullanıcıya yönelik tasarruf tavsiyeleri sunmaktadır [154].

Yapılan bir çok çalışmada, çok katlı binalarda veya su tüketiminin yüksek olduğu müstakil evlerde gri sudan ısı geri kazanımının enerji verimliliği konusunda önemli bir potansiyel içerdiği belirtilmektedir [157–160]. Konutlarda oluşan ısı değeri yüksek gri suyun %80-%90'nı duş başlığı kaynaklı meydana gelmektedir [161]. Bir araştırmaya göre atık sıcak sudan ısı geri kazanımı (DWHR) sisteminin kullanılması ile sıcak su üretiminde kullanılan enerji %26,3 oranında azaltılabilmektedir [162]. Bu sistem ile özellikle duşta kullanılan atık sıcak suyun ısı enerjisi geri kazanılarak, kombi veya şofben kazanında bulunan soğuk suyun ön ısıtılmasında kullanılmaktadır.



Şekil 8. Isı geri kazanım modelinin şeması (Heat recovery system diagram) [162]

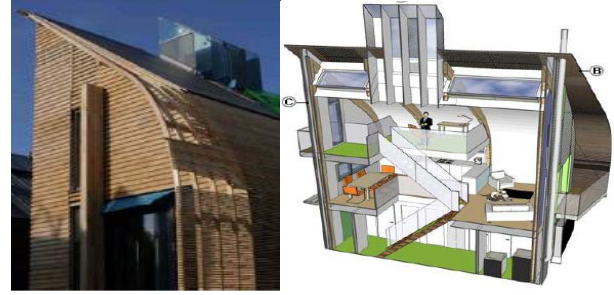
DWHR (Şekil 8) sistemleri sağladıkları elektrik tasarrufu ile elektrikli şofbenlerle birlikte kullanıldıkları zaman yapılacak yatırımın geri ödeme süresi 4 ile 9 yıl arasında değişmektedir. Elektrik fiyatlarının olası yükselişi ile bu sürenin daha da kısılacağı öngörülmektedir. Doğal gazla çalışan şofbenler söz konusu olduğunda ise geri ödeme süreleri 15 yılı aşmaktadır, bu durumda geri kazanım sistemleri ancak gaz fiyatlarında yaşanacak büyük yükselişlerden sonra avantajlı hale gelebilecektir [162].

8. PASİF SOĞUTMA YÖNTEMLERİ (PASSIVE COOLING METHODS)

Binaların soğutma ihtiyaçlarının azaltabilmesi amacıyla günümüzde pasif soğutma yöntemlerine yapıların tasarımı sırasında önem verilmeye başlanmıştır. Örnek olarak farklı boyutlarda pencerelerin tercih edilmesi endüstriyel yöntemler kullanmadan binalarda pasif soğutma sağlarken, ısınarak yükselen havanın tahliyesi için yükseğe konumlandırılan pencereler ile kullanıcıları rahatsız edecek hava akımlarının önüne geçilebilmektedir. Doğal havalandırma, özellikle küçük boyutlu alanlarda daha etkili olurken mutfak gibi özel havalandırma gereksinimi duyan iç mekanlarda tek çözüm yolu olarak kullanılması önerilmemektedir [163]. Doğal havalandırmadan en yüksek verimin alınabilmesi için yapıların tasarımı sırasında bölgedeki rüzgarların esiş yönüne dikkat edilmesi gerekmektedir.

Kuru ve sıcak bölgeler için rüzgâr bacaları (Şekil 9) enerji tasarrufu sağlayan doğal havalandırma yöntemlerinden biridir. Dışarıdan gelen serin ve

temiz hava, içeride bulunan kirli ve ısınmış havayı vakum etkisiyle dışarı yönlendirmektedir [164]. Bina tasarım ve inşasında yaşanan teknolojik gelişimlere rağmen, binlerce yıldır kullanılan geleneksel çözümler ile sıfır enerjili binaların havalandırma ihtiyacına doğal çözümler üretilebilmektedir. Özellikle Ortadoğu bölgesinde yüzlerce yıldır kullanılan rüzgâr kulesi ve rüzgâr kepçesi gibi uygulamalar, günümüz mimari tasarımlarında (Şekil 10 ve 11) kendine yer bulmaya başlamıştır [165].



Şekil 9. Sıfır enerjili bir ofis ve rüzgâr bacası kullanımı (A zero energy office and the use of a windcatchers) [163]



Şekil 10. Rüzgâr kepçesi örneği, Masdar Enstitüsü Abu Dabi (Windcatcher example, Masdar Institute Abu Dhabi) [166]



Şekil 11. Rüzgâr kepçesi örneği, Prenses Nora Üniversitesi Suudi Arabistan (Windcatcher example, Princess Nora University Saudi Arabia) [166]

Sıcak iklim bölgelerinde yer alan yapılardaki geniş saydam yüzeyler, optik özelliklerine bağlı olarak güneş ışınlarının taşıdığı ısıyı iç mekâna ileterek soğutma ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Mimari tasarımından ödün vermeden kullanılacak gölgeleme elemanları (Şekil 12) ile ısı kayıpları en aza indirilebilmektedir [167].

Pencere	Yatay Gölgeleme Elemanı	Yatay Çift Gölgeleme Elemanı	Tek Yöne Eğimli Gölgeleme Elemanı	Tek Yöne Eğimli Çift Gölgeleme Elemanı	Yatay Panjur	Yatay İç Yöne Eğimli Panjur
						
Yatay Dış Yöne Eğimli Panjur	Düsey Panjur	Tüm Cepheyi Kaplayan Güneş Kırıcı	Yarım Cepheyi Kaplayan Güneş Kırıcı	Cepheyi Yarım Kaplayan Panjur Güneş Kırıcı	Konsol Olarak Entegre Edilen Panjur	Pencere Çeperini Saran Gölgeleme Elemanı
						

Şekil 12. Gölgeleme elemanlarının bina kabuğuna entegrasyon türleri (Types of integration of shading elements into the building envelope) [167]

Günümüzde gölgeleme elemanları otomasyon sistemleri ile kontrol edilerek, iç ortamdaki aydınlık düzeyi ve iç mekâna etkileyen ısı şiddet seviyesi kontrol altında tutulabilmektedir. Abu Dabi'de 2012 yılında tamamlanan 29 katlı, Al Bahar Kulesi'nin bina kabuğuna entegre hareketli gölgeleme elemanları (Şekil 13) otomasyon ile yönetilmektedir [165]. Aktif gölgeleme elemanlarının Al Bahar Towers'da kullanılmaya başlamasıyla birlikte, soğutma kaynaklı elektrik tüketiminde dönemsel olarak %50 ila %81 arasında düşüş yaşandığı belirtilmektedir [168].



Şekil 13. Al Bahar Towers hareketli gölgeleme elemanı tasarımı (Dynamic shading element design for Al Bahar Towers) [169]

Bina kabuğunun açık renkli olması, yapıya gelen güneş ışınlarını yansıtarak güneş ışınımı kaynaklı ısı transferini en aza indirmeye yardımcı olmaktadır. Bu uygulamanın örneklerine, sıcak kuru iklime sahip Güneydoğu Anadolu bölgesinde yer alan Mardin, Urfa ve Diyarbakır'daki geleneksel konutlarda rastlamak mümkündür [165]

Bir diğer pasif soğutma yöntemi olan yeşil çatı ve dikey yeşil giydirmeye gibi yöntemler binaya etkileyen güneş ışınlarının ısıtıcı etkisini kontrol altına almaya yardımcı olmaktadır. Yapılan literatür araştırmalarına göre, bina üzeri ve çevresine uygulanan yeşil peyzaj çalışmalarıyla bina içi sıcaklıklarında 5°C ila arasında 9°C düşüş gözlenirken, soğutma ihtiyacında yaşanan azalma ile enerji tüketimlerinde %6 ile %20 arasında tasarruf yapılabileceği tespit edilmiştir [170].

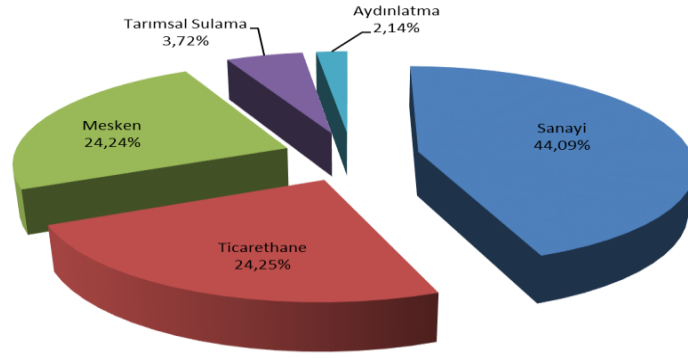
9. TÜRKİYE ÖRNEĞİ (THE CASE OF TURKEY)

Konforlu yaşam isteği ve zamana bağlı değişen alışkanlıklar nedeniyle enerji tüketimi artan bir eğilim içerisinde, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de yaşanan nüfus artışı bu eğilimi destekliyor. Enerji talebinin büyük bölümünün ithal edildiği düşünüldüğünde, bu durum zaman içerisinde cari açığın artmasına neden olacağı gibi ulusal bağımsızlık önünde de engel teşkil etmekte. Enerjide dışa bağımlı olan Türkiye için, bu tüketimin karşılanabilmesi adına enerji tüketiminde verimlilik ilkesinin izlenmesi daha da önem kazanmaktadır. Enerji verimliliği çalışmaları ile konutlardaki yaşam standardı yükseltilebileceği gibi, aynı zamanda enerjinin boşa harcanmasının da önüne geçilebilecektir.

9.1. Elektrik Tüketimi (Electricity Consumption)

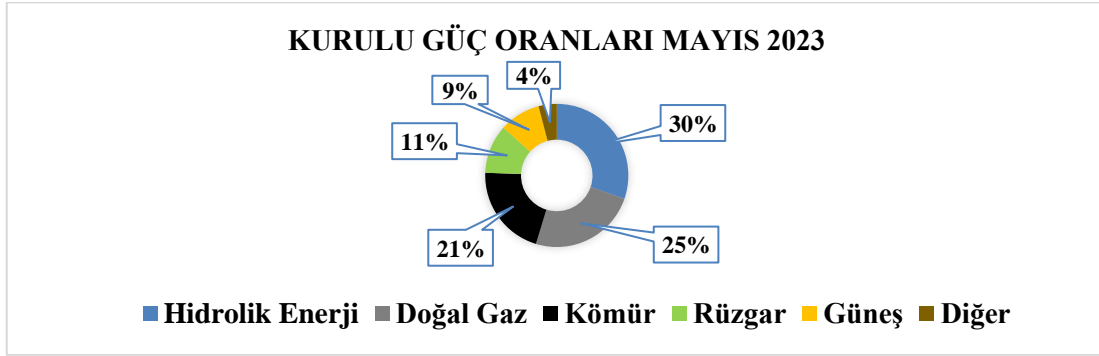
Türkiye'nin, Ulusal Enerji Planına göre elektrik tüketiminin 2000'den 2020'ye kadar yıllık ortalama %4,4 artışla 128 TWh'ten 306,1 TWh'e çıktığı ifade edilmekle birlikte, 2035 yılına kadar ortalama %3,5 artışla tüketimin 510,5 TWh'e ulaşacağı öngörülmüştür. Projeksiyonlara göre bu süreç boyunca hane halkının elektrik tüketiminde ortalama %2,3 artış beklenirken, bu oranın hizmet sektöründe %2,2 olacağı tahmin ediliyor [171].

Türkiye genelinde faturalanan elektrik tüketimi incelendiğinde, 2021 yılında 253 TWh olarak gerçekleştiği görülmüştür [172]. Şekil 14'te gösterilen dağılım incelendiğinde, tüketilen toplam elektriğin yaklaşık %25'i meskenlerde kullanıcı konforunu sağlamak üzere ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma gereksinimleri için kullanılmaktadır. Bu oranın üzerine ticari binaların tüketim değerleri de eklendiği zaman, Türkiye'deki toplam tüketimin yaklaşık %48'nin binalarda tüketildiği ortaya çıkmaktadır.



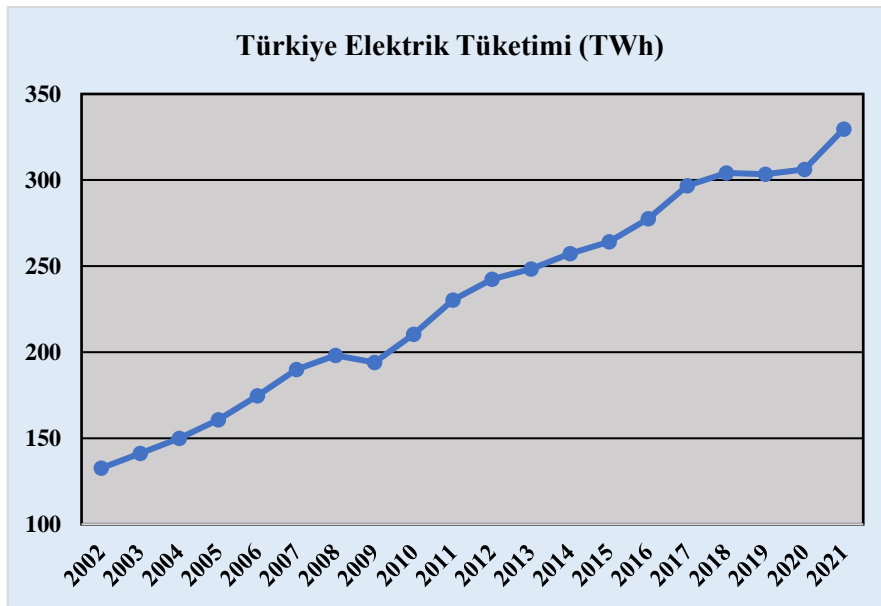
Şekil 14. 2021 Yılı Faturalanan Tüketimin Tüketici Türüne Göre Dağılımı (%) (Consumer Type Distribution of Invoiced Consumption in 2021) [172]

2023 Mayıs sonu itibarıyla kurulu güç miktarı 104.691 MW'a ulaşırken, kaynaklara göre dağılımı Şekil 15'te gösterilmektedir. Elektrik tüketimine bakıldığı zaman ise, yıl boyunca 328,7 TWh olarak gerçekleştiği saptanmıştır.



Şekil 15. Mayıs 2023 itibarıyla kurulu güç oranları (%) (Installed capacity rates as of May 2023) [173]

Türkiye'nin elektrik tüketiminin 2002-2021 yılları arasındaki değişimi incelendiğinde ise (Şekil 16), 2008 yılındaki global ekonomik kriz ile 2019 yılındaki COVID-19 pandemi süreci haricinde sürekli artan bir trend içerisindedir [173].



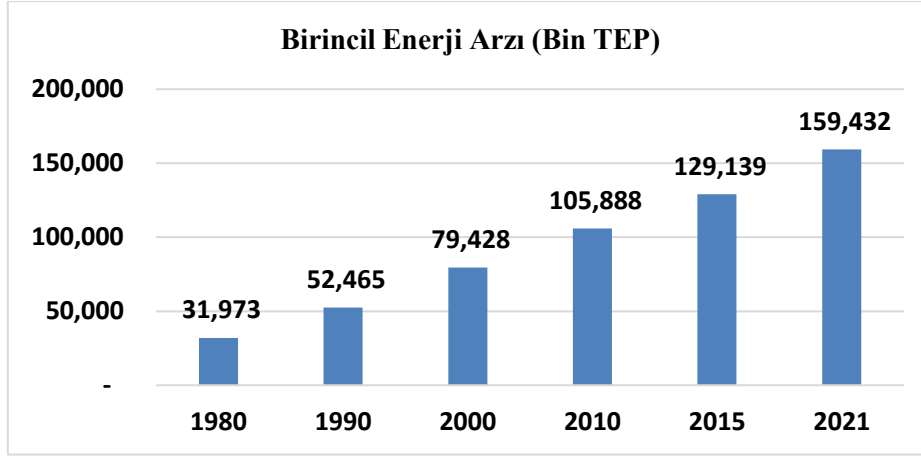
Şekil 16. 2002-2021 yılları arasında Türkiye elektrik tüketiminin değişimi (Change in Türkiye's electricity consumption between 2002-2021)

9.2. Enerji Görünümü ve Enerji Verimliliği

Kavramı (Energy Outlook and Energy Efficiency Concept)

Türkiye'nin 2021 itibarıyla %93,2'yi bulan şehirlileşme oranı [174] enerjiye olan talebi de artırmaktadır. Şekil 17'de görüldüğü gibi 1980 yılında 31,9 milyon TEP olan birincil enerji arzı,

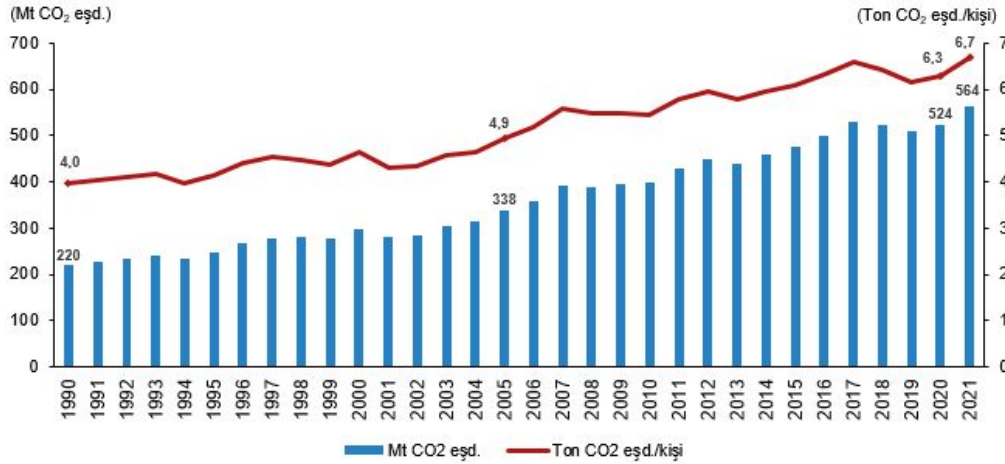
2021 yılında 159,4 milyon TEP'e ulaşmıştır [175]. Türkiye'nin enerji talebi üzerine yapılan bir çalışmada 2040 yılı için enerji talep tahmini 220,8 milyon TEP olarak hesaplanmıştır [176]. Bu veriler ışığında Türkiye'nin enerji talebinin zaman içerisinde daha da artacağını tahmin etmek doğru olacaktır.



Şekil 17. Türkiye'nin yıllar içerisindeki enerji arzı (Turkey's energy supply over the years)

1990-2021 yılları arasındaki trendin incelendiği sera gazı emisyon istatistiklerine göre (Şekil 18), 2021 yılı toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %7,7 artarak 564,4 milyon ton (Mt)

CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmakta [177]. 1990 yılındaki kişi başı toplam sera gazı emisyonu 4 ton CO₂ olurken, 2021 yılında bu değer 6,7 ton CO₂ seviyesine çıktığı görülmüştür.



Şekil 18. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2021 (Total and per capita greenhouse gas emissions, 1990-2021) [177]

1972-2002 dönemini kapsayan ve 82 ülkenin incelendiği çalışmada, ekonomik büyüme ile enerji tüketimi arasında pozitif korelasyon olduğu tespit edilmiştir [178]. Benzer üç çalışmada, 1970-2006 [179], 1980-2015 [180] ve 1990-2019 [181] yılları arasında içerecek şekilde Türkiye özelinde gerçekleştirilerek aynı sonuca ulaşılmıştır. Sektörel enerji tüketimi ile kişi başına düşen milli gelir

arasındaki ilişkiyi inceleyen bir diğer çalışmada ise, 132 ülkenin verileri üzerinde çalışılarak enerji tüketiminin kişi başına düşen milli geliri olumlu yönde etkilediği ileri sürülmüştür [183]. Yapılan çalışmalar ışığında, ekonomik büyüme ile enerji tüketiminin birbirlerini çift yönlü olarak etkiledikleri anlaşılmaktadır.

Ekonomik büyüme için gerekli olduğu sonucuna varılan enerji tüketimini düşürmeden, gerekli büyümeyi sağlayabilmenin en ucuz ve çevreci yolu olarak tüketilen enerjinin daha verimli kullanılması gösterilebilir. Enerji verimliliği ve enerji tasarrufu, her zaman örtüşmeyen iki ayrı kavramdır. Artan enerji verimliliği, enerji tasarrufu ile sonuçlanmayabilir veya bu kavramlar bağımsız olarak var olabilir ve politika müdahalesi ile ayrı ayrı hedeflenebilir. Enerji tasarrufu, enerji verimliliğinin iyileştirilmesinden ayrılabilir ve davranış değişiklikleri (kullanılmadığında ekipmanı kapatmak) veya sistem koşullarındaki değişiklikler (düşük iç ortam sıcaklığı, daha düşük üretim veya kullanım seviyeleri gibi) nedeniyle gerçekleşebilir [182]. Enerji tasarrufu var olan kullanımı kısıtlamaya odaklanırken, enerji verimliliği ise kullanıcıların konfor seviyesini düşürmeden enerjiyi daha etkin kullanmayı önceler.

Günümüzde enerji verimliliği yaygın olarak uygulanabilen, ekonomik ve güvenli enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmekte ve dünya genelinde enerji geçiş stratejilerinin önemli bir ayağı olarak görülmektedir. Enerji verimliliği konusunda yapılan akademik çalışmalar, politika yapıcılara olduğu kadar uygulayıcılara da yol

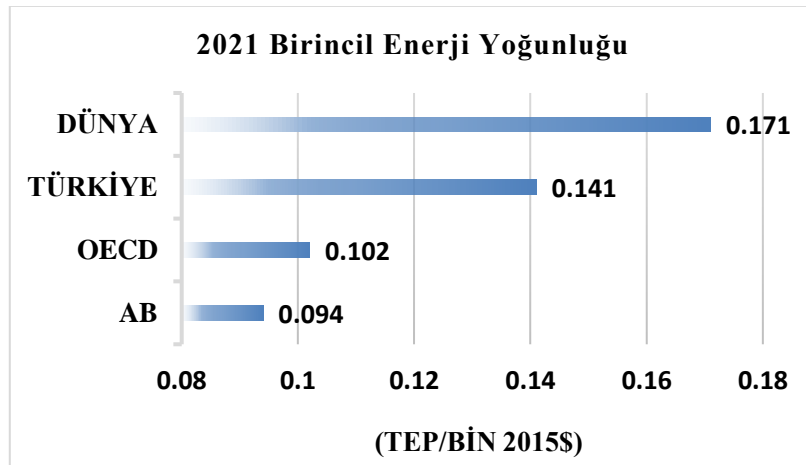
göstermektedir [183]. Dünyada enerji verimliliği genel olarak enerji yoğunluğu kavramı ile ölçülmektedir. Enerji yoğunluğu değerinin düşük olması, enerjinin verimli kullanıldığını göstermektedir. Enerji yoğunluğu genel olarak iki şekilde tanımlanabilir.

- Bir birim ürün elde edilebilmesi için harcanan enerji miktarı (özellik/spesifik enerji tüketimi)
- Gayri Safi Yurtiçi Milli Hasıla (GSYİH) başına tüketilen enerji miktarı (TEP: ton eşdeğer petrol)/belli bir baz yılına göre 1000 \$ GSYİH eldesi için tüketilen TEP cinsinden enerji miktarı

Enerji yoğunluğu ve kişi başına enerji tüketimi verisi, enerji verimliliğinin en yaygın kullanılan ölçütlerdir. Tablo 1'de görüldüğü gibi Türkiye'nin 2000 yılında 0,192 olan enerji yoğunluğu 2021 yılında 0,141'e düşmüştür. Aynı süreçte ekonomik büyümenin bir göstergesi olan fert başına enerji tüketiminin 1,19 TEP seviyesinden 1,88 TEP'e çıktığı görülmektedir. Tüketim artarken enerji yoğunluğunun düşüyor olması, enerjinin daha verimli kullanılarak ekonomik büyümenin sağlandığı sonucunu ortaya koymaktadır [175].

Tablo 1. Türkiye’de enerji yoğunluğu ve fert başına düşen enerji tüketimi (Energy intensity and energy consumption per capita in Türkiye) [175]

Yıl	Enerji Yoğunluğu	Fert Başına Enerji Tüketimi (TEP)
2000	0,192	1,19
2005	0,169	1,27
2010	0,172	1,43
2015	0,149	1,64
2021	0,141	1,88



Şekil 19. Birincil enerji yoğunluğu karşılaştırması (Primary energy intensity comparison) [175]

Uluslararası bir karşılaştırma yapabilmek adına Şekil 19'da enerji yoğunluğunun 2021 yılı itibariyle AB'de 0,094, OECD ülkelerinde 0,102, dünyada ise 0,171 olduğu gösterilmektedir [175].

1980'lerden sonra dünya genelinde enerji politikalarında enerji verimliliği uygulamaları önem kazanmaya başlamıştır [184]. Enerji verimliliği, sera gazı azaltımı ve enerjiye yönelik maliyetlerin düşürülmesi amacıyla geliştirilen politikalar, stratejiler ve yeni teknolojileri kapsayan çalışmalar olarak tanımlanmakta [185], sürdürülebilir kalkınmanın ve enerji arz güvenliğinin sağlanmasında önemli bir faktör olduğu

değerlendirilmektedir [176]. Yapılan çalışmalar sonucunda küresel enerji yoğunluğu 1990-2019 arasında yaklaşık %35 azalmıştır [186].

Enerji verimliliği ile ilgili bir diğer çalışmada, Amerika Enerji Verimli Ekonomi Konseyi'nin (ACEEE) 2022 yılı raporudur. 2022 yılı Uluslararası Enerji Verimliliği Puan Tablosu (The 2022 International Energy Efficiency Scorecard) adlı raporda Türkiye dahil 25 ülkenin uyguladıkları enerji verimliliği politikalarına göre karşılaştırma yapılmıştır. Aldıkları toplam puanlara göre ülkeler Tablo 2'de sıralanmaktadır [187].

Tablo 2. 2022 Uluslararası enerji verimliliği puan durumu (2022 International energy efficiency standings) [187]

Sıralama	Ülkeler	Puan	Sıralama	Ülkeler	Puan
1	Fransa	74,5	14	Meksika	46
2	İngiltere	72,5	15	Türkiye	45,5
3	Hollanda	71,5	16	Hindistan	41,5
3	Almanya	71,5	17	Endonezya	38
5	İtalya	68,5	18	Avustralya	35,5
6	İspanya	66	19	Brezilya	34
7	Japonya	63,5	20	Mısır	31,5
8	Tayvan	58,5	20	Tayland	31,5
9	Çin	57,5	22	Rusya	28
10	Amerika	54	23	Suudi Arabistan	25
11	Güney Kore	53	24	Güney Afrika	23,5
12	Polonya	51	25	Birleşik Arap Emirlikleri	21,5
13	Kanada	49,5			

9.3. Enerji Verimliliği Politikaları (Energy Efficiency Policies)

Enerji verimliliği alanında yaşanan gelişmelere rağmen Türkiye'nin, gelişmiş ülkelere kıyasla 'enerji yoğun' ekonomilerden biri olduğu Şekil 12'de görülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Eurostat verilerine göre ülkemizin enerji yoğunluğunun OECD ve AB-27 ortalamalarının üzerinde olması sebebiyle, enerji yoğunluğunu azaltıcı çalışmaların devlet politikalarıyla da desteklenmesi gerekmektedir. Enerji verimliliği alanındaki en kapsamlı yasal düzenleme 2 Mayıs 2007 tarihinde 26510 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu'dur.

Enerji verimliliği kanununun yayınlanmasından sonra enerji verimliliği ile ilgili politikalara yönelik düzenlemeler, strateji belgeleri ve eylem planları

açıklanarak enerji politikalarının çerçevesi belirlenmiştir [176]. Koçtaşlan'nın yürürlükte olan yönetmelik ve mevzuatları incelediği çalışmasında, Türkiye'nin enerji verimliliği ile ilgili yasal düzenlemelerinin Avrupa Birliği'nin enerji verimliliği düzenlemeleri ile benzer seviyede olduğu sonucu aktarılmaktadır [188]. Yağcı ve Sözen ise, 2015-2017 dönemi verilerine göre 18 Avrupa Ülkesi ile karşılaştırıldığında Türkiye'nin verimlilik performansının ortalamasının altında kaldığını tespit ederek, var olan politikaların daha iyi benimsenmesi için halkın aydınlatılması gerektiğini paylaşmışlardır [189].

5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve bu kanuna bağlı olarak çıkartılan Binalarda Enerji Performansı yönetmeliğine göre, 1 Ocak 2011'tarihi itibari ile 50 m² üzeri inşaat alanına sahip tüm binalarda Enerji Kimlik Belgesi (EKB) çıkarılması zorunlu hale

gelmiştir. Enerji Kimlik Belgesi, asgari olarak binanın enerji ihtiyacı, enerji tüketim sınıflandırması, yalıtım özellikleri ve ısıtma ve/veya soğutma sistemlerinin verimi ile ilgili bilgilerini içeren bir belgedir [190].

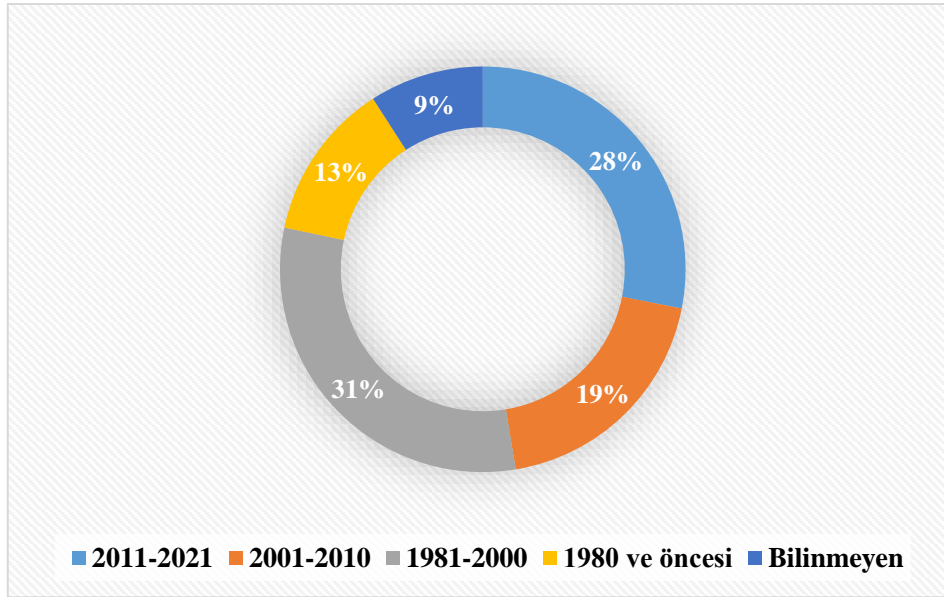
Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ile getirilen önemli konulardan biri de ısı yalıtım projesinin gerekliliğidir. Yeni yapılacak binalara yapı kullanma izin belgesi alınabilmesi için içeriği mevzuata uygun olarak hazırlanmış ısı yalıtım projesi hazırlanması gerekmektedir. Aksi takdirde yapı ruhsatı alınamayacaktır. Ayrıca binalarda ısı yalıtımına standart getiren TSE 825 ve konutlarda kullanılan elektrik ev aletlerine yönelik A ve üzeri derecelendirme çalışması yürürlüğe sokulmuştur.

Toplam inşaat alanı en az 20.000 m² veya yıllık toplam enerji tüketimi 500 TEP ve üzeri olan ticari ve hizmet binaları ile toplam inşaat alanı en az 10.000 m² veya yıllık toplam enerji tüketimi 250 TEP ve üzeri olan kamu kesimi binalarının yönetimleri, bina ve tesislerinde enerji yöneticisi bulundurma, tüketimi 1000 TEP üzeri kurumlarda ise enerji yöneticisi birimi oluşturma zorunluluğu getirilmiştir [191].

Bu çalışmalara ek olarak, binaların enerji verimliliğini denetleyerek etüt ve danışmanlık hizmeti sunan Enerji Verimliliği Danışmanlığı (EVD) şirketleri ile kamu binaları için 15 yıla kadar vadeli performans sözleşmesi imzalanabilmesi gibi verimlilik artırıcı yenilikler yürürlüğe girmiştir [192]. Yürürlükteki en güncel plan olan On Birinci Kalkınma Planında 2019-2023 (OBKP), daha önceki planlara göre en büyük farkın enerji verimliliği ile ilgili politik bakışta yaşandığı tespit edilmiştir. Bu planla birlikte tespit edilen iyileştirme adımları sektörel bazda farklılık göstermeye başlamıştır [193].

9.4. Konut Veri ve İstatistikleri (Housing Data and Statistics)

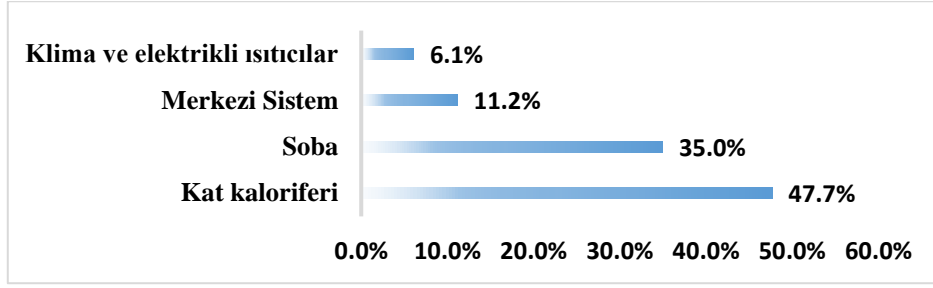
Türkiye 'nin nüfusu 2021 yılında 84 milyon 680 bin 273 kişi olurken, 2021 Eylül sonu itibarıyla toplam konut sayısı 40,2 milyon olarak açıklanmaktadır [194]. Konutların inşa edildiği yıllar incelendiğinde, %30,9'unun 1981-2000, %28,1'inin 2011-2021, %19,3'ünün 2001-2010 yılları arasında, %12,6'sının ise 1980 ve öncesine ait olduğu Şekil 20'de görülmektedir [195].



Şekil 20. 2021 itibarıyla konutların inşa edildiği zaman aralığı (%) (Time period in which houses were built as of 2021) [195]

Konutlarda tercih edilen ısıtma sistemlerine bakıldığında (Şekil 21), %47,7 ile kat kaloriferinin ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Bunu sırasıyla %35 ile soba ve %11,2 ile merkezi kalorifer tertibatı izlemektedir. Isıtmada kullanılan yakıt türleri

incelendiğinde ise, ilk sırada %59,6 ile doğalgazın yer aldığı tespit edilmektedir. Doğalgazı sırasıyla %33,5 ile kömür, odun türü katı yakıt ve son olarak %6,2 ile elektrik takip etmektedir [195].



Şekil 21. 2021 itibariyle konutlarda tercih edilen ısıtma sistemleri (%) (Preferred heating systems in residences as of 2021) [195]

Ülkemizde kullanılan enerjinin yaklaşık %70'i ithal edilirken bu enerjinin yaklaşık %30'u konutlarda kullanılmaktadır. Konutların ülke genelindeki nihai elektrik tüketimine bakıldığı zaman ise, bu oranın %43'ü aştığı görülmektedir [196].

Konut sektörü, enerji tüketiminde sanayi sektöründen sonra ikinci sırada yer almaktadır. Ancak, ülkemizdeki binaların çoğunluğunun Binalarda Enerji Performansı yönetmeliğinden önce yapılmış olması sebebiyle (%62,8) güncel enerji verimliliği standartlarını karşılayamamaktadır. Bu nedenle yeterli önlem alınmamış eski binalarda enerji kayıplarının yüksek olduğu tahmin edilmektedir.

Türkiye'deki bina sayısının yaklaşık 8,5 milyon olduğu ve bunun da %86,8'nin konutlardan oluştuğu düşünüldüğünde, yapılacak verimlilik çalışmalarının kazandıracığı potansiyel tasarruf miktarının yıllık 7 milyar doları bulacağı hesaplanmaktadır [196]. Tasarruf edilebilecek bu bütçe ile çevrenin korunması adına geliştirilecek diğer projeler finanse edilebilir.

9.5. Isıtma (Heating)

Türkiye'deki hane halkının mesken ısıtmasında yaptığı tercihlerde belirleyici olan etkenleri ele alan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu alanda yapılan araştırmalar incelendiğinde, bulunan çalışmalarının neredeyse tamamının Hanehalkı Bütçe Anketi'nin (HBS) verilerini kullandığı tespit edilmiştir [197–200]. İpek ve arkadaşları ise mesken ısıtma tercihlerini araştırdıkları çalışmalarında, 4 yıllık süre zarfında (2016, 2017, 2018, 2019), 5706 hanede 22803 gözlemci ile gerçekleştirilen Gelir ve Yaşam Koşulları Araştırması (ILC) sonuçlarından yararlanmıştı [201].

Ekonomik gelişim seviyelerine dayanan araştırmaların sonuçları incelendiğinde, enerji

basamağı hipotezine (Energy Ladder) uygun olarak hane halkının gelir düzeyi arttıkça temiz enerji kaynaklarına olan yönelim de artmaktadır. Mesken içinde sağlığa zararlı kirleticiler yaymayan enerji kaynaklarına temiz enerji kaynakları denmektedir. Temiz enerji kaynaklarına örnek olarak etanol, metanol, LPG, doğal gaz ve elektrik gösterilebilir [202].

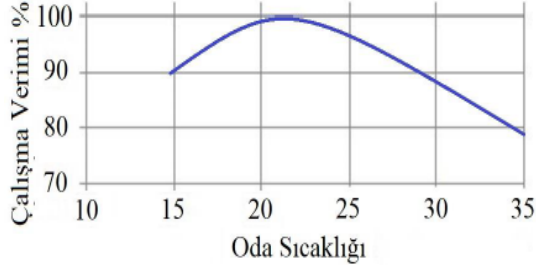
Isıtma tercihlerinde etkili olan bir diğer faktörün de sosyo-kültürel yapı olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmalara göre eğitim seviyesi yükseldikçe hane halkının odun ve kömür kullanma ihtimali düşerken, doğal gaz ve elektriği tercih etme olasılığı artmaktadır. Bu durum eğitim seviyesi daha yüksek bireylerin çevre sorunları konusunda daha duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır [201]. Öte yandan, müstakil evlerde yaşayan hane halkının ısınma için odun, kömür veya gübreyi tercih etme olasılığı daha yüksektir. Türkiye'nin kırsal kesimlerinde insanların büyük bir kısmının müstakil evlerde yaşaması nedeniyle bu durum dikkate değer bir faktördür.

Sonuç olarak Türkiye'deki eğitim ve gelir seviyelerinde yaşanacak artışın temiz enerji talebini önemli ölçüde artıracığı beklenmektedir [201]. Bu nedenle hanelerin faydalanabileceği yenilenebilir enerji kaynaklarının, hane bazlı kurulumlarını kolaylaştırıp teşvik edecek politikaların yürürlüğe girmesi faydalı olacaktır.

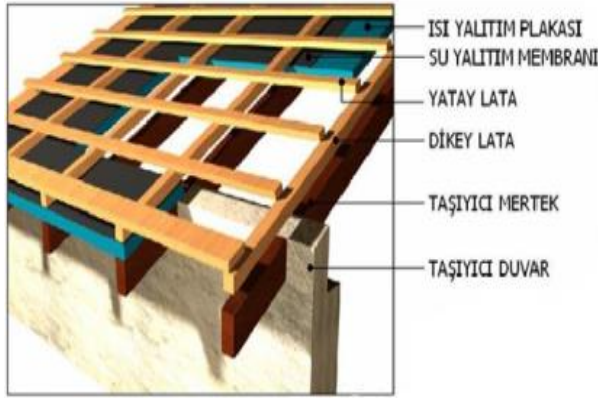
9.6. Yalıtım ve Isıl Konfor (Insulation & Thermal Comfort)

Binalarda iklimlendirme, ısı konforu sağlamak amacıyla yapılırken tüketilen enerjini %80'nini oluşturmaktadır [203]. Isıl konfor, kişinin bulunduğu ortamla ilgili bir sorun yaşamadan verimli şekilde çalışabileceği ısı parametrelerinin sağlanması olarak açıklanabilir [204].

Yapısı gereği öznel bir değerlendirme kriteri olup kişilerin his ve duygularına dayanan ısı konfor, aynı mekânda bulunan farklı kişiler tarafından değişik yorumlanabilmektedir [205]. Uluslararası normlara göre ısı konfora sahip iç mekân sıcaklıkları yaz aylarında 21-22 °C, kış aylarında ise 20-21 °C'dir [204]. Değişen oda sıcaklıklarının çalışma verimine olan etkisi Şekil 22'de verilmiştir [206].



Şekil 22. Sıcaklığın çalışma verimine etkisi (The effect of temperature on working efficiency) [206]



Şekil 23. Mertek arasına, mertek altına, mertek üzerine yalıtım (Insulation between, under and on the rafters) [207]

İç ortam sıcaklığı ile iç yüzey sıcaklığı farkının 2-3 °C 'den fazla olmadığı durumlar kullanıcılarda konfor hissiyatı oluşturmaktadır. Yeterli yalıtıma sahip olmayan binalarda ısı konfor sağlanamamaktadır [208]. Bu duruma örnek olarak yalıtımlı duvar iç yüzey sıcaklığı ile yalıtımsız duvar iç yüzey sıcaklığı arasındaki farkın yaz aylarında 17-18 °C seviyesine çıkması gösterilebilir [209]. Yalıtım eksikliği nedeniyle binalarda meydana gelen ısı kayıpları genel olarak dış duvar, pencere, çatı, bodrum döşemesi ve hava kaçağı olmak üzere 5 yerde incelenebilir [210, 211]. Çatı yalıtımının uygulama şeması Şekil 23'te görülebilmektedir. Türkiye'de farklı iklim koşulunda uygulanacak yalıtım miktarları TS 825 Standardında belirtilmektedir.

9.7. Pasif Ev (Passive House)

Türkiye ve benzer iklim şartlarına sahip Avrupa ülkelerindeki 2000 yılı ve sonrası inşa edilmiş yapılar incelendiğinde, Türkiye'deki yapıların ortalama %50 daha fazla enerji tükettiği ortaya çıkmıştır [212]. Aşıkoğlu ve arkadaşları çalışmalarında bu sorunun çözümüne katkı sunabilecek, pasif teknikler kullanarak binalardaki enerji veriminin artırılmasını incelemiştir.

Pasif Ev kavramı, temelde karasal iklime sahip bölgelerde yer alan yapıların ısıtma enerjisi ihtiyacının azaltılmasına yönelik olarak ortaya çıkmıştır [213, 214]. Bir yapının gerekli koşulları karşılayabilmesi için, genellikle daha planlama aşamasında enerji kayıplarını minimize edecek şekilde bulunduğu fiziki çevreyle uyumlu tasarlanması gerekmektedir [215]. Pasif Ev şartnamesinde özet olarak yıl boyunca 1 m² yaşam alanını ısıtmak için 1.5 litreden az petrol, 1.5 m³'ten az doğalgaz ve 15-20 kWh/m²'den az elektrik kullanımı hedeflenmektedir [216].

İzmir Karşıyaka'da bulunan 8 katlı, 36 daireli bir bina, Pasif Ev Enstitüsü tarafından hazırlanan EnerPHit sertifika programı üzerinden değerlendirilerek Pasif Ev standardını karşılayabilmesi için gerekli olan iyileştirmeler araştırılmıştır. Araştırmalarının sonucunda yapıda asgari bir iyileştirme yapılması durumunda [217]:

- Birincil enerji ihtiyacında %49 düşüş,
- Isıtma enerjisi ihtiyacında ise %63 tasarruf sağlanabileceği ortaya çıkmıştır.

9.8. Gri Suyun Yerinde Arıtılması (On-site Greywater Treatment)

Su kıtlığı ile mücadele kapsamında evsel atık suyun karakterizasyonlarına bağlı olarak ayrık (örneğin; gri su, siyah su gibi) halde toplanması, nüfus yoğunluğu yüksek şehirler için dikkate alınmaya başlanan yenilikçi çözümlerden biridir. Özellikle İstanbul gibi su talebinin giderek arttığı yerleşim bölgelerinde, küvet ve duşa kabinlerden, banyo lavabolarından, çamaşır yıkama ve kurutma ünitelerinden ve mutfak lavabolarından toplanan gri suyun arıtma tesislerine gitmeden yerinde arıtılarak yeniden kullanılması fikri araştırılmaya başlanmıştır [218].

Gri su diğer atık su çeşitlerine göre daha büyük hacimlerde üretilirken, kirlilik seviyesi siyah suya

göre daha düşüktür [219]. Buna karşın $10^4 - 10^6$ CFU/ml fekal koliform içerebilen gri suyun, özellikle yaz aylarında artan patojen miktarı da göz önüne alındığında çeşitli artıma proseslerine (fiziksel, kimyasal veya biyolojik) tabi tutulması zorunlu görülmektedir [220, 221]. Gelişmiş ülkelerde günlük olarak kişi başı 100-150 L seviyelerinde oluşan evsel atık suyun %60-70'lik kısmı gri sudan oluşmaktadır [222]. Başarılı bir şekilde toplanıp uygun teknolojilerle arıtılabilen gri sular, tuvaletlerde sifon suyu olarak kullanılabilir [218].

Gri suyun yeniden kullanımı gerekli altyapı, küvet, duş, çamaşır makinesi ve diğer ilgili ünitelerin çıkışından toplanabilmesi için ayırık bir hattın inşasına ihtiyaç duyması nedeniyle binaların İlk Yatırım Maliyetlerini (İYM) arttırmaktadır. Köse İstanbul'da yaptığı araştırmada, 160 ve daha fazla daire içeren yüksek katlı yapıların yatırım maliyetine göre fizibil hale geleceğini tespit etmiştir [218].

9.9. Otopark Yönetmeliği (Parking Regulations)

25 Mart 2021 tarihinde yayımlanan 31434 sayılı Resmî Gazete'de belirtildiği üzere, 80 metrekareden küçük her 3 daire için en az 1, 80-120 metrekare arasındaki her 2 daire için en az 1, 120-180 metrekare arasındaki her daire için en az 1 ve 180 metrekare üzeri her daire için 2 otopark yeri ayrılması zorunlu tutulmuştur. Kapalı otoparklarda, sürücü ve yayaların güvenliğini sağlayabilmek için şartnamelerde belirtilen aydınlatma seviyelerinin karşılanması gerekmektedir. Binalarda tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %20'sinin [223] aydınlatma için kullanıldığı göz önüne alındığında, kullanımı giderek artacak otoparklardaki aydınlatmanın verimliliği önem kazanmaktadır.

Kocaman'ın bu konu üzerine Bitlis Eren Üniversitesi'nde yer alan kapalı otoparklarda yaptığı araştırmada, aydınlatma sistemlerinde eski nesil floresanlar yerine LED ampullerin kullanılması durumunda ulaşılabilecek tasarruf miktarı ile yapılacak yatırımın kendini 1,83 yılda amorti edeceğini belirtmektedir [224].

9.10. Enerji Verimliliği: Örnek Çalışmalar (Energy Efficiency: Case Studies)

Akgül ve arkadaşları 2022 yılında tamamladıkları çalışmalarında, öncelikle 2007 yılında inşa edilen okul binasının enerji verimliliği etüdünü

gerçekleştirip sonrasında ise yürürlükteki yönetmelikleri göz önüne alarak tespit ettikleri eksiklikler üzerine çeşitli önerilerde bulunmuşlardır [30]. Yapılacak toplam 319.653 TL yatırım sonucunda:

- Yalıtım ve ortam ısısının takibi ile ısıtma talebinde %53 düşüş
- Floresanların LED'ler ile değiştirilmesi ile aydınlatma giderlerinde yıllık %56 azalış
- Yıllık CO₂ salınımında %53 düşüş ile 66,18 ton CO₂/yıl emisyon tasarrufu
- 334.379 kWh/yıl tasarruf ile yatırımın 6,1 yıl içinde geri ödeneceğini hesaplanmaktadır.

Bu örnekte de görüldüğü üzere, 2007 yönetmeliğinden önce inşa edilmiş okullarda yapılacak verimlilik çalışmaları ile yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlanabileceği anlaşılmaktadır.

Coşkun ve Oktay çalışmalarında Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık binasının enerji taramasını yaparak, enerji verimliliği konusundaki potansiyel iyileştirme noktalarını incelemişlerdir [225]. Araştırmacılar analizlerine elektrik ve su tüketiminden sağlanacak kazançlar ile doğal aydınlatmanın getireceği verim artışı dâhil etmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre yapılacak dış yalıtım ile:

- Enerji harcanmasında %34 tasarruf,
- CO₂ Emisyonunda 89 ton azalış
- Doğalgaz tüketiminde ise 45.000 m³ düşüş ön görülmektedir.

Altınöz ve Mıhlıyanlar tarafından yapılan bir araştırmada, yalıtımlı ve yalıtımsız mevcut binalara aktif güneş enerjisi sistemlerinin entegre edilmesiyle yakalanacak tasarruf miktarı araştırılmıştır [226]. Aktif güneş enerjisi sistemlerinin eklenmesiyle:

- Yalıtımlı binaların enerji tüketimlerinde %17, CO₂ salınımlarında %32,
- Yalıtımsız binaların enerji tüketimlerinde %32, CO₂ salınımlarında %67 düşüş gözlenmiştir.

İki katlı bir yapının yalıtımlı ve yalıtımsız hallerinin karşılaştırıldığı Ülker'in yüksek lisans çalışmasında aktarıldığı üzere, ısı yalıtımlı yapının %78,4 daha az enerji tükettiği görülürken, CO₂ emisyonlarında da %70 düşüş saptanmıştır [227]. Binalarda ısı kaybına yol açan bölgeler sırasıyla [228]:

- %20-50 oran ile ısı köprülerinde,
- %15-25 oranında dolgu duvarlarda,
- %25 tavanda,
- %10-25 pencerelerde,
- %10 döşemeler şeklinde sıralanmaktadır.

Uçar ve Balo'nun Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yapılan yalıtım çalışmalarını incelediği araştırmalarında [229]:

- XPS ile yalıtılan binalardaki en uzun geri ödeme süresine sahip il 4,5 yıllı İskenderun olmaktadır. Ilıman iklime sahip bölgede ihtiyaç duyulan ısıtma miktarı düşük olduğundan, geri ödeme süresi uzamaktadır.

Güçül ve Köksal araştırmalarında Ankara'da yer alan 500 m² kullanım alanına sahip bir konutun ısıtma performansını inceleyerek, olası iyileştirme çalışmalarının neticesinde elde edilecek tasarruf miktarlarını paylaşmışlardır [230].

- Pencere değişimi ile 25 GJ,
- Dış duvar izolasyonu ile 4 GJ,
- Çatı izolasyonu ile 51 GJ enerji tasarrufu,
- Sıcak su temini için güneş kolektörü kurulmasıyla ise yıllık %68 iyileştirme eldesi.

Çomaklı ve Yüksel yaptıkları çalışmada, Atatürk Üniversitesi ısıtma merkezinin enerji ve ekserji miktarlarını analiz etmiştir. Analiz sonuçlarına göre: [231].

- Gerekli yalıtımın uygulanmasıyla yakıt tüketiminde %30 tasarruf öngörülmektedir.

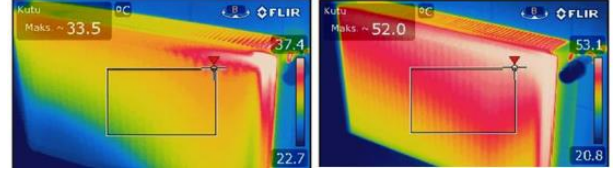
Kılıçlı'nın Ege Üniversitesi'nde yer alan Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü'nün enerji verimliliğini artırmaya yönelik yaptığı çalışmalara göre gerekli iyileştirmelerin yapılması sonucunda [232]:

- Binaların yıllık enerji tüketiminde %21 tasarruf sağlanmaktadır.

Yürük ve arkadaşlarının, binalarda yer alan tesisatların düzenli temizlenmesinin ısıtma performansı üzerine olan etkisini araştırdıkları çalışmalarının neticesinde [233]:

- Radyatör sıcaklıklarında 5°C'lik artış görülürken,
- Isı transfer mekanizmasında %17,2'lik iyileşme,

- Yakıt tüketiminde ise %21,16'lık bir düşüş saptanmıştır.



Şekil 24. Mutfak radyatörünün termal kamera görüntüleri a)TRV'li b)TRV'siz (Thermal camera images of kitchen radiator a)With TRV b)Without TRV) [234]

Karaçam ve arkadaşlarının termostatik radyatör vanası (TRV) kullanımının etkileri hakkında yaptıkları deneysel çalışmalara göre, Şekil 24'te görülebileceği üzere TRV'nin yer aldığı radyatörün yüzeyinde daha homojen bir ısı dağılımı gözlemlenmektedir [234]. Termostat, oda sıcaklığı ayarlanan değere geldiği zaman otomatik olarak vana üzerindeki pimi iterek su akışını keser ve vanayı kapatır. TRV, oda sıcaklığı iki derece düşünce tekrar devreye girerek vana üzerindeki pimi itmeyi bırakır ve peteğin tekrar ısınmasını sağlar.

Bu durumun neticesine göre:

- Yakıt tüketiminde %40 tasarruf beklenirken,
- CO₂ Miktarındaki düşüş yıllık 470 kg olmaktadır.
- Yatırımın geri ödeme süresi ise 1,67 yıl olarak hesaplanmaktadır.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Düzenli ekonomik büyüme ile kişi başı enerji tüketimi arasında yüksek korelasyon bulunduğu pek çok araştırmada dile getirilmektedir [178–181, 235]. Sağlıklı ve sürdürülebilir bir kalkınma hamlesi için enerji tüketiminin kısıtlanması değil, tüketilen enerjinin daha verimli kullanılması gerektiği aktarılmaktadır [182]. Enerji verimliliği çalışmaları sonucunda belirlenen hedeflere ulaşılması halinde, kişi başı enerji tüketimi artarken enerji yoğunluğunun düşmekte olduğu gözlemlenecektir.

Enerji verimliliği projelerinin hayata geçirilebileceği öncelikli alanlardan birisi de enerji yoğun olan inşaat sektörüdür. Tüm yaşam döngüsü boyunca (inşa, işletme, yıkım) yoğun miktarda enerjinin tüketildiği konutlarda, yapılacak

yatırımlar ile hızlı ve yüksek verim artışlarının yakalanabildiği görülmektedir [196].

Enerji verimliliği çalışmalarında gerçeğe en yakın projeksiyon ancak verinin doğru kaynaktan belirli bir süreklilik içerisinde toplanmasıyla oluşturulabilmektedir. Alınacak kararların gündelik hayat koşulları ile uyum derecelerinin belirlenmesi için nicel verilere dayalı sonuçlar elde edebilmek çok önemlidir. Bu amaca yönelik yapılan bir çalışmanın neticesinde araştırmacıların önerileri şu şekildedir [116]:

- Ortak yaşam alanlarında anlık ölçüm yapacak sensörler (sıcaklık, nem ve CO₂) yerleştirmek
- Aşırı sıcak ya da soğuk gibi kritik ısı değişimlerinin düzenli olarak takip ve analizi
- Toplanan verilerin işlenerek makine öğrenmesi üzerinden enerji verimliliği önerilerinin eldesi
- HVAC sistemlerinin otomasyon üzerinden kontrol edilerek her yapı şartına cevap verebilir hale getirilmesi
- Kullanıcıları hem iç hava kalitesinin hem de sürdürülebilir enerji tüketiminin önemi konusunda bilinçlendirmek

HVAC sistemlerinin IoT ile entegre edilmesi, ortam sıcaklığı ve CO₂ konsantrasyonu gibi parametrelerinin sürekli gözlem altında tutulmasını sağlayarak, optimum konfor koşullarını korurken aynı zamanda gereksiz enerji tüketiminin de önüne geçmektedir [116].

Yürütülecek çalışmaların verimli bir şekilde ilerleyebilmesi için öncelikle durum tespitinin doğru yapılması, sonrasında da ulaşılabilir gerçekçi hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmalar sırasında toplanacak verilerin sektör paydaşları ile açık bir şekilde paylaşılması, alanda çalışacak yeni kişi ve kuruluşların katılımını teşvik edecektir. Kullandığı enerjinin önemli bir kısmını ithal eden (%70) Türkiye'nin, enerji verimliliği konusunda enerji zengini ülkelere kıyasla daha fazla mesafe kat etmesi gerektiği aşikardır. En son Ulusal Enerji Planı'nda yinelenen enerji bağımsızlığı hedeflerine ulaşmak için, başta kamu olmak üzere tüm toplum kesimlerinin açıklanan politikaları benimseyerek üzerlerine düşen yükümlülüklerini yerine getirmesi gerekmektedir. Belirlenen hedeflere ulaşarak iklim değişikliğinin yol açtığı sorunların minimize etme gayesi, özel sektör ve kamunun koordineli bir şekilde çalışmasını zorunluluk haline getirmektedir.

Demirsoy ve arkadaşlarının 2015-2017 yılları arasında ülke genelinde il bazlı konut tipi binaların

enerji performanslarını inceledikleri çalışmalarında, enerji verimliliği çalışmalarının hız kazanıp uygulanabilirliğinin artabilmesi için çeşitli öneriler aktarılmıştır [236]. Bu öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Enerji Kimlik Belgesi'nde daha üst enerji sınıflarına çıkılmasına olanak sağlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının konutlarda kullanımı teşvik edilmelidir.
- Halihazırda EKB yönetmeliğinde yeni binalar için minimum değer olarak kabul edilen C sınıfı, mevcut binalar için uygulanmaya başlanarak yeni binalarda bu değer B sınıfına yükseltilmelidir.
- Belirlenecek bir sınıfın üzerinde yer alan konutların inşası için teşvik ve belirli bir miktar hibe verilmeli, üretilecek konutların hem alım-satım aşamasında hem de oturma sırasında çeşitli vergi indirimleri sağlanmalıdır.
- Yapılan işlemler belirli aralıklarla alanında yetkin kişiler tarafından denetlenerek yönergelere uygunluğu kontrol edilmeli ve tespit edilen uygunsuzluklara idari para cezası öngören yasal düzenlemeler çıkarılmalıdır.

Bina cephelerinde yapılacak mantolama ve yalıtım çalışması ile ısıtma giderlerinde %12 ile %47 arasında tasarruf sağlanması mümkün gözükmektedir [237]. 15.000-50.000 € arasında tutacağı öngörülen yatırımın, elde edilecek tasarruf ile kendini beş ile dokuz yıl arasında geri ödeyeceği hesaplanmaktadır. Buna karşılık sadece termal yalıtımlı camların kullanılması ile kazanılacak iyileştirme oranı %10'nun altında kalırken, geri ödeme süresi on beş yılın üzerine çıkmaktadır. Bu sonuçlar literatürde yapılan diğer çalışmaların sonuçları ile benzerlik göstermektedir [238-241]. Çalışmaların tamamına bakıldığında, maksimum verimin elde edilebilmesi için dış cephe yalıtımının bir bütün olarak ele alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, üretim verim ve güvenirliliğini artıran enerji depolama sistemlerinden olan termal depolamanın kullanılmaya başlanmasıyla birlikte CO₂ emisyonlarında %21,42 düşüş görülürken [70], bu oran hidrojen bazlı depolamanın entegre edildiği hidrolik ve güneş enerji kurulumlarına sahip sistemde %50 oranını aşmaktadır [106]. Güncel elektrik fiyatları göz önüne alınarak yapılan projeksiyonlar göreyse, depolamalı fotovoltaik kurulumların herhangi bir ek sübvansiyon devreye

alınmaksızın 7 yıldan kısa sürede kendini geri ödeyeceği belirtilmektedir [71].

Düşük maliyetler (2.000 €'dan daha az) ile eski tip ampulleri yeni nesil LED ampuller ile yenileyerek aydınlatma kaynaklı elektrik tüketiminde %50-75 arasında bir tasarruf sağlanabilirken, edilecek tasarruf miktarı ile bu yatırımın geri ödeme süresi iki yıldan az olmaktadır [242].

Fuel oil kullanan verimsiz kazanların modern biyoyakıt kazanlarıyla değiştirilmesi nispeten daha yüksek bir yatırım gerektirirken (15.000-45.000 €), yeni kazanların sahip olduğu yüksek verimlilik sayesinde ısıtma giderleri %20 ile %30 arasında azaltılabilmektedir. Verimlilik artışının yanı sıra, biyoyakıt fiyatlarının fuel oil'e göre daha düşük olması ile yapılacak yatırımın geri dönüşü iki ile beş yıl arasında sağlanabilmektedir. Buna ek olarak biyoyakıt kullanan yeni nesil kazan ve şofbenlerin, fuel oil ile çalışan eski versiyonlarla karşılaştırıldığında CO₂ emisyonlarında %95 azalma potansiyeli bulunmaktadır [237]. Diğer yandan yerden ısıtmaya sahip ısı pompalı sistemin, aynı yapıda kullanılacak doğalgaz kazanlı sisteme göre işletme maliyetinde yıllık %36 tasarruf kazandırabileceği tespit edilmiştir [66].

Artan nüfusun tatlı su ihtiyacının karşılanabilmesi adına, deniz suyunun arıtılması gibi [137-141] hane halkı için ulaşılması güç yöntemlere alternatif olarak yağmur suyu hasadı ekolojik bir çözümdür. Bu yöntemle toplanacak yağmur suyunun [142], gerek duyulan zamanlarda evsel ihtiyaçlar için kullanılmasının %30-60 arasında tasarruf sağlayabileceği ön görülmektedir [144].

DWHR sistemleri sağladıkları elektrik tasarrufu ile elektrikli şofbenlerle birlikte kullanıldıkları zaman yapılacak yatırımın geri ödeme süresi 4 ile 9 yıl arasında değişmektedir. Elektrik fiyatlarının olası yükselişi ile bu sürenin daha da kısalacağı öngörülmektedir. Doğal gazla çalışan şofbenler söz konusu olduğunda ise geri ödeme süreleri 15 yılı aşmaktadır, bu durumda geri kazanım sistemleri ancak gaz fiyatlarında yaşanacak büyük yükselişlerden sonra avantajlı hale gelebilecektir [162].

Yaklaşık 8,5 milyon yapıda 40,2 milyon konutun yer aldığı Türkiye'de, toplumun geniş kesimlerini içerisine alacak bir yenileme hareketi ile yıllık 7 milyar doların (\$) [196] üzerinde bir tutarın boşa gitmesinin önüne geçilebilir. Sağlanacak tasarruf miktarı, en başta iklim ve nüfus değişikliklerine

bağlı olarak giderek artan su kıtlığı sorunu ile mücadele olmak üzere toplumun refah seviyesini artırıcı diğer yatırımlarda kullanılabilir.

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

ACEEE	Amerika Enerji Verimli Ekonomi Konseyi
AI	Yapay zekâ
AMR	Otomatik sayaç okuma
ASHP	Hava kaynaklı ısı pompası
BIPV	Binaya entegre fotovoltaik sistem
BMS	Bina yönetim sistemleri
BS	Bataryalı depolama
CSS	Chirp yayılma spektrumu
DWHR	Atık sıcak sudan ısı geri kazanımı
EC	Avrupa Komisyonu
ECM	Enerji tasarrufu önlemleri
EE	Gömülü enerji
EGD	Avrupa Yeşil Mutabakatı
EGHG	Gömülü enerji sera gazı emisyonları
EPBD	Binaların Enerji Performansı Direktifi
EVD	Enerji verimliliği danışmanlığı
GSHP	Toprak kaynaklı ısı pompası
HBS	Hane halkı bütçe anketi
HVAC	Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
ILC	Gelir ve yaşam koşulları araştırması
İYM	İlk Yatırım Maliyeti
KFL	Kompakt flüoresan lambalar
LCA	Yaşam döngüsü analizi
LOHC	Sıvı organik hidrojen taşıyıcılar
LPWA	Düşük güçlü geniş alan ağı
LTRS	Uzun vadeli yenileme stratejisi
MMR	Manuel sayaç okuma
NSEB	Net sıfır emisyonlu bina
NZE	Net sıfır enerji
nZEB	Neredeyse sıfır enerjili binalar
NZEB	Sıfır enerjili binalar
OBKP	On Birinci Kalkınma Planı 2019-2023
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü
RES	Yenilenebilir enerji kaynakları
SESH2ES	Hidrojen bazlı enerji depolama sistemleri
TEP	Ton eşdeğer petrol
TES	Termal enerji depolama

TRV	Termostatik radyatör vanası
XPS	Ekstrüde polistiren
ZEB	Sfır emisyonlu binalar

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] WMO. (2022). 2021 one of the seven warmest years on record, WMO consolidated data shows. World Meteorological Organization. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2021-one-of-seven-warmest-years-record-wmo-consolidated-data-shows>
- [2] Mihiretu, A., Okoyo, E. N., & Lemma, T. (2021). Causes, indicators and impacts of climate change: understanding the public discourse in Goat based agro-pastoral livelihood zone, Ethiopia. *Heliyon*, 7(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06529>
- [3] Jakučionytė-Skodienė, M., & Liobikienė, G. (2021). Climate change concern, personal responsibility and actions related to climate change mitigation in EU countries: Cross-cultural analysis. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125189. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125189>
- [4] UNFCCC. (2021). The Glasgow Climate Pact. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>
- [5] Pokhrel, S. R., Hewage, K., Chhipi-Shrestha, G., Karunathilake, H., Li, E., & Sadiq, R. (2021). Carbon capturing for emissions reduction at building level: A market assessment from a building management perspective. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126323. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126323>
- [6] Hannah Ritchie, Max Roser, & Pablo Rosado. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. [OurWorldInData.org](https://www.ourworldindata.org).
- [7] Qian, D., Li, Y., Niu, F., & O'Neill, Z. (2019). Nationwide savings analysis of energy conservation measures in buildings. *Energy Conversion and Management*, 188, 1–18. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.03.035>
- [8] Nazeriye, M., Haeri, A., Haghghat, F., & Panchabikesan, K. (2021). Understanding the influence of building characteristics on enhancing energy efficiency in residential buildings: A data mining based study. *Journal of Building Engineering*, 43, 103069. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103069>
- [9] Zhong, K., Chen, X., Meng, Q., Ran, M., Zhang, Z., Liu, X., & Feng, C. (2022). Application of the air-pipe rack heat exchanger heating system in residential buildings of Guangzhou. *Journal of Building Engineering*, 61, 105280. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105280>
- [10] SFOE. (2021). Buildings. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/effizienz/gebaeude.html>
- [11] SFOE. (2020). Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html/>
- [12] Mata, Korpál, A. K., Cheng, S. H., Jiménez Navarro, J. P., Filippidou, F., Reyna, J., & Wang, R. (2020). A map of roadmaps for zero and low energy and carbon buildings worldwide. *Environmental Research Letters*, 15(11), 113003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABB69F>
- [13] IEA. (2022). Buildings 2021. <https://www.iea.org/reports/buildings>
- [14] Fenner, A. E., Kibert, C. J., Li, J., Razkenari, M. A., Hakim, H., Lu, X., ... Sam, M. (2020). Embodied, operation, and commuting emissions: A case study comparing the carbon hotspots of an educational building. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122081. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122081>
- [15] Skillington, K., Crawford, R. H., Warren-Myers, G., & Davidson, K. (2022). A review of existing policy for reducing embodied energy and greenhouse gas emissions of buildings. *Energy Policy*, 168, 112920. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2022.112920>
- [16] Lenzen, M., Geschke, A., Wiedmann, T., Lane, J., Anderson, N., Baynes, T., ... West, J.

- (2014). Compiling and using input–output frameworks through collaborative virtual laboratories. *Science of The Total Environment*, 485–486(1), 241–251. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.03.062>
- [17] Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592–1600. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.05.007>
- [18] Chastas, P., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment*, 105, 267–282. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.05.040>
- [19] European Commission. (2020). A Renovation Wave for Europe: Greening Our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives-Copenhagen Centre on Energy Efficiency.
- [20] European Commission. (2020). Stepping up Europe’s 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people | Knowledge for policy.
- [21] European Commission. (2022). Long-term renovation strategies.
- [22] Ali Yildirim, M., Bartyzel, F., Vallati, A., Woźniak, M. K., & Ocloń, P. (2023). Efficient energy storage in residential buildings integrated with RESHeat system. *Applied Energy*, 335, 120752. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.120752>
- [23] European Commission. (2020). Energy efficiency in buildings.
- [24] Belaïd, F. (2018). Exposure and risk to fuel poverty in France: Examining the extent of the fuel precariousness and its salient determinants. *Energy Policy*, 114, 189–200. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2017.12.005>
- [25] Pasichnyi, O., Wallin, J., Levihn, F., Shahrokni, H., & Kordas, O. (2019). Energy performance certificates — New opportunities for data-enabled urban energy policy instruments? *Energy Policy*, 127, 486–499. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.11.051>
- [26] Muller, C., & Yan, H. (2018). Household fuel use in developing countries: Review of theory and evidence. *Energy Economics*, 70, 429–439. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2018.01.024>
- [27] Curtis, J., McCoy, D., & Aravena Novielli, C. (2017). Determinants of residential heating system choice: an analysis of Irish households. *Papers*.<https://ideas.repec.org/p/esr/wpaper/wp576.html>
- [28] Kowsari, R., & Zerriffi, H. (2011). Three dimensional energy profile: A conceptual framework for assessing household energy use. *Energy Policy*, 39(12), 7505–7517. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.06.030>
- [29] Braun, F. G. (2010). Determinants of households’ space heating type: A discrete choice analysis for German households. *Energy Policy*, 38(10), 5493–5503. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.04.002>
- [30] Akgül, E., Kayabaşı, E., & Özdalyan, B. (2022). Investigation of Methods to Increase Energy Efficiency in Old Buildings: A Case Study on a School Building Constructed in 2007. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(4), 1631–1653. <https://doi.org/10.29130/DUBITED.924358>
- [31] European Commission. (2020). Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council: establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2020-0162_EN.html
- [32] European Commission. (2021). Energy performance of buildings directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- [33] Costa, G., Sicilia, Á., Oregi, X., Pedrero, J., & Mabe, L. (2020). A catalogue of energy conservation measures (ECM) and a tool for their application in energy simulation models. *Journal of Building Engineering*, 29, 101102. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.101102>
- [34] Węglarz, A., & Narowski, P. (2011). The optimal thermal design of residential buildings using energy simulation and fuzzy sets theory. In *Proceedings of Building Simulation 2011:12th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Sydney.
- [35] Kisilewicz, T., Fedorcak-Cisak, M., & Barkanyi, T. (2019). Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls. *Energy and Buildings*, 205, 109541. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109541>
- [36] Cholewa, T., Siuta-Olcha, A., & Anasiewicz, R. (2019). On the possibilities to increase energy efficiency of domestic hot water preparation systems in existing buildings – Long term field research. *Journal of Cleaner Production*, 217, 194–203. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.138>

- [37] Chwieduk, B., & Chwieduk, D. (2021). Analysis of operation and energy performance of a heat pump driven by a PV system for space heating of a single family house in polish conditions. *Renewable Energy*, 165, 117–126. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.11.026>
- [38] Fokaides, P. A., Panteli, C., & Panayidou, A. (2020). How Are the Smart Readiness Indicators Expected to Affect the Energy Performance of Buildings: First Evidence and Perspectives. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9496, 12(22), 9496. <https://doi.org/10.3390/SU12229496>
- [39] Balaras, C. A., Droutsas, K. G., Dascalaki, E. G., Kontoyiannidis, S., Moro, A., & Bazzan, E. (2019). Urban Sustainability Audits and Ratings of the Built Environment. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 4243, 12(22), 4243. <https://doi.org/10.3390/EN12224243>
- [40] Oti, A. H., Kurul, E., Cheung, F., & Tah, J. H. M. (2016). A framework for the utilization of Building Management System data in building information models for building design and operation. *Automation in Construction*, 72, 195–210. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2016.08.043>
- [41] Sesana, M. M., & Salvalai, G. (2018). A review on Building Renovation Passport: Potentialities and barriers on current initiatives. *Energy and Buildings*, 173, 195–205. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.05.027>
- [42] Bernardi, E., Carlucci, S., Cornaro, C., & Bohne, R. A. (2017). An Analysis of the Most Adopted Rating Systems for Assessing the Environmental Impact of Buildings. *Sustainability* 2017, Vol. 9, Page 1226, 9(7), 1226. <https://doi.org/10.3390/SU9071226>
- [43] European Commission. (2022). Nearly zero-energy buildings. Energy efficiency. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en
- [44] Blasch, J., Filippini, M., & Kumar, N. (2019). Boundedly rational consumers, energy and investment literacy, and the display of information on household appliances. *Resource and Energy Economics*, 56, 39–58. <https://doi.org/10.1016/J.RESENEECO.2017.06.001>
- [45] Boogen, N., Daminato, C., Filippini, M., & Obrist, A. (2020). Can Information about Energy Costs Affect Consumers Choices? Evidence from a Field Experiment. *Economics Working Paper Series*, 20/334. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000413129>
- [46] Filippini, M., & Obrist, A. (2022). Are households living in green certified buildings consuming less energy? Evidence from Switzerland. *Energy Policy*, 161, 112724. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2021.112724>
- [47] Cozza, S., Chambers, J., & Patel, M. K. (2020). Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland. *Energy Policy*, 137, 111085. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.111085>
- [48] Seyedzadeh, S., Rahimian, F. P., Glesk, I., & Roper, M. (2018). Machine learning for estimation of building energy consumption and performance: a review. *Visualization in Engineering* 2018 6:1, 6(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/S40327-018-0064-7>
- [49] Buratti, C., Barbanera, M., & Palladino, D. (2014). An original tool for checking energy performance and certification of buildings by means of Artificial Neural Networks. *Applied Energy*, 120, 125–132. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.01.053>
- [50] Xue, Y., Temeljotov-Salaj, A., & Lindkvist, C. M. (2022). Renovating the retrofit process: People-centered business models and co-created partnerships for low-energy buildings in Norway. *Energy Research & Social Science*, 85, 102406. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102406>
- [51] Mejjaouli, S., & Alzahrani, M. (2020). Decision-making model for optimum energy retrofitting strategies in residential buildings. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 211–218. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.07.008>
- [52] Alam, M., Zou, P. X. W., Stewart, R. A., Bertone, E., Sahin, O., Buntine, C., & Marshall, C. (2019). Government championed strategies to overcome the barriers to public building energy efficiency retrofit projects. *Sustainable Cities and Society*, 44, 56–69. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.09.022>
- [53] Weiss, J., Dunkelberg, E., & Vogelpohl, T. (2012). Improving policy instruments to better tap into homeowner refurbishment potential: Lessons learned from a case study in Germany. *Energy Policy*, 44, 406–415. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.02.006>
- [54] Caputo, P., & Pasetti, G. (2015). Overcoming the inertia of building energy retrofit at municipal level: The Italian challenge. *Sustainable Cities and Society*, 15,

- 120–134.
<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2015.01.001>
- [55] Achtnicht, M., & Madlener, R. (2014). Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits. *Energy Policy*, 68, 254–263.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2014.01.006>
- [56] Hou, J., Liu, Y., Wu, Y., Zhou, N., & Feng, W. (2016). Comparative study of commercial building energy-efficiency retrofit policies in four pilot cities in China. *Energy Policy*, 88, 204–215.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2015.10.016>
- [57] Castleberry, B., Gliedt, T., & Greene, J. S. (2016). Assessing drivers and barriers of energy-saving measures in Oklahoma's public schools. *Energy Policy*, 88, 216–228.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2015.10.010>
- [58] Simonsen, M., Aall, C., Jakob Walnum, H., & Sovacool, B. K. (2022). Effective policies for reducing household energy use: Insights from Norway. *Applied Energy*, 318, 119201.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119201>
- [59] Hille, J., Simonsen, M., & Aall, C. (2012). Trends and drivers for energy use in Norwegian households.
- [60] Statistics Norway. (2014). Any immigrants are financially vulnerable- Type of housing and housing standard for immigrants, by country background. <https://www.ssb.no/inntekt-og-forbruk/artikler-og-publikasjoner/mange-innvandre-re-er-okonomisk-sarbare>
- [61] Tabatabaei, S. A., & Treur, J. (2016). Comparative Analysis of the Efficiency of Air Source Heat Pumps in Different Climatic Areas of Iran. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 547–558.
<https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2016.04.008>
- [62] Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764.
<https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2020.101764>
- [63] Yılmazoğlu, M. Z. (2010). Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması. *Politeknik Dergisi*, 13(1), 33–42.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/politeknik/issue/33052/367855>
- [64] Mouzeviris, G. A., & Papakostas, K. T. (2020). Comparative analysis of air-to-water and ground source heat pumps performances. <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1794864>.
- [65] Brenn, J., Soltic, P., & Bach, C. (2010). Comparison of natural gas driven heat pumps and electrically driven heat pumps with conventional systems for building heating purposes. *Energy and Buildings*, 42(6), 904–908.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2009.12.012>
- [66] Yılmaz, F., Gürel, A. Ç., & Akdemir, Ç. (2023). Bir Villanın Isı Pompası ile Isıtılmasının Performans ve Çevresel İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 64(710), 114–136.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/76644/1268691>
- [67] Temel, Ö. (2016). Türkiye'de Bölgelere Göre Isı Pompası Seçim Kriterleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
<http://openaccess.ogu.edu.tr:8080/xmlui/handle/11684/1240>
- [68] Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764.
<https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2020.101764>
- [69] Saini, L., Meena, C. S., Raj, B. P., Agarwal, N., & Kumar, A. (2021). Net Zero Energy Consumption building in India: An overview and initiative toward sustainable future. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1948417>
- [70] Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., & Aste, N. (2022). Building decarbonization: Assessing the potential of building-integrated photovoltaics and thermal energy storage systems. *Energy Reports*, 8, 574–581.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.10.322>
- [71] Zhao, G., Clarke, J., Searle, J., Lewis, R., & Baker, J. (2023). Economic analysis of integrating photovoltaics and battery energy storage system in an office building. *Energy and Buildings*, 284, 112885.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.112885>
- [72] Liu, C., Xu, W., Li, A., Sun, D., & Huo, H. (2019). Analysis and optimization of load matching in photovoltaic systems for zero energy buildings in different climate zones of China. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117914.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117914>
- [73] Nordin, N. D., & Abdul Rahman, H. (2016). A novel optimization method for designing stand alone photovoltaic system. *Renewable Energy*, 89, 706–715.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.12.001>

- [74] Okoye, C. O., & Solyali, O. (2017). Optimal sizing of stand-alone photovoltaic systems in residential buildings. *Energy*, 126, 573–584. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.03.032>
- [75] Liu, J., Liu, Z., Wu, Y., Chen, X., Xiao, H., & Zhang, L. (2022). Impact of climate on photovoltaic battery energy storage system optimization. *Renewable Energy*, 191, 625–638. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.04.082>
- [76] Akter, M. N., Mahmud, M. A., & Oo, A. M. T. (2017). Comprehensive economic evaluations of a residential building with solar photovoltaic and battery energy storage systems: An Australian case study. *Energy and Buildings*, 138, 332–346. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.12.065>
- [77] Zou, B., Peng, J., Yin, R., Li, H., Li, S., Yan, J., & Yang, H. (2022). Capacity configuration of distributed photovoltaic and battery system for office buildings considering uncertainties. *Applied Energy*, 319, 119243. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119243>
- [78] Zhang, J., Cho, H., Luck, R., & Mago, P. J. (2018). Integrated photovoltaic and battery energy storage (PV-BES) systems: An analysis of existing financial incentive policies in the US. *Applied Energy*, 212, 895–908. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.12.091>
- [79] Antunes Campos, R., Rafael do Nascimento, L., & Rüther, R. (2020). The complementary nature between wind and photovoltaic generation in Brazil and the role of energy storage in utility-scale hybrid power plants. *Energy Conversion and Management*, 221, 113160. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113160>
- [80] Hoppmann, J., Volland, J., Schmidt, T. S., & Hoffmann, V. H. (2014). The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1101–1118. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.068>
- [81] Linssen, J., Stenzel, P., & Flear, J. (2017). Techno-economic analysis of photovoltaic battery systems and the influence of different consumer load profiles. *Applied Energy*, 185, 2019–2025. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.11.088>
- [82] Guarino, F., Cassarà, P., Longo, S., Cellura, M., & Ferro, E. (2015). Load match optimisation of a residential building case study: A cross-entropy based electricity storage sizing algorithm. *Applied Energy*, 154, 380–391. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.04.116>
- [83] Bayod-Rújula, Á. A., Haro-Larrode, M. E., & Martínez-Gracia, A. (2013). Sizing criteria of hybrid photovoltaic–wind systems with battery storage and self-consumption considering interaction with the grid. *Solar Energy*, 98(PC), 582–591. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2013.10.023>
- [84] Candanedo, J., Salom, J., Widén, J., & Athienitis, A. (2015). Load matching, grid interaction, and advanced control. Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings, 207–240. <https://doi.org/10.1002/9783433604625.CH06>
- [85] Niveditha, N., & Rajan Singaravel, M. M. (2022). Optimal sizing of hybrid PV–Wind–Battery storage system for Net Zero Energy Buildings to reduce grid burden. *Applied Energy*, 324, 119713. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119713>
- [86] Rajan Singaravel, M. M., & Arul Daniel, S. (2013). Studies on battery storage requirement of PV fed wind-driven induction generators. *Energy Conversion and Management*, 67, 34–43. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2012.10.020>
- [87] Rehman, H. ur, Reda, F., Paiho, S., & Hasan, A. (2019). Towards positive energy communities at high latitudes. *Energy Conversion and Management*, 196, 175–195. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.06.005>
- [88] Ma, T., & Javed, M. S. (2019). Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for remote island considering the saturation of each renewable energy resource. *Energy Conversion and Management*, 182, 178–190. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.12.059>
- [89] Celik, A. N. (2002). Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems. *Energy Conversion and Management*, 43(18), 2453–2468. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00198-4)

- [90] De Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414–419. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.06.007>
- [91] Navarro, L., de Gracia, A., Colclough, S., Browne, M., McCormack, S. J., Griffiths, P., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. *Renewable Energy*, 88, 526–547. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.11.040>
- [92] Simó-Solsona, M., Palumbo, M., Bosch, M., & Fernandez, A. I. (2021). Why it's so hard? Exploring social barriers for the deployment of thermal energy storage in Spanish buildings. *Energy Research & Social Science*, 76, 102057. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102057>
- [93] Vérez, D., Borri, E., Zsembinszki, G., & Cabeza, L. F. (2023). Thermal energy storage co-benefits in building applications transferred from a renewable energy perspective. *Journal of Energy Storage*, 58, 106344. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.106344>
- [94] Bedsworth, L. W., & Hanak, E. (2013). Climate policy at the local level: Insights from California. *Global Environmental Change*, 23(3), 664–677. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2013.02.004>
- [95] Lee, D., Ooka, R., Matsuda, Y., Ikeda, S., & Choi, W. (2022). Experimental analysis of artificial intelligence-based model predictive control for thermal energy storage under different cooling load conditions. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103700. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2022.103700>
- [96] Borri, E., Zsembinszki, G., & Cabeza, L. F. (2021). Recent developments of thermal energy storage applications in the built environment: A bibliometric analysis and systematic review. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116666. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALEN.2021.116666>
- [97] Palanisamy, D., & Ayalur, B. K. (2019). Development and testing of condensate assisted pre-cooling unit for improved indoor air quality in a computer laboratory. *Building and Environment*, 163, 106321. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106321>
- [98] Wang, K., Nakao, S., Thimmaiah, D., & Hopke, P. K. (2019). Emissions from in-use residential wood pellet boilers and potential emissions savings using thermal storage. *Science of The Total Environment*, 676, 564–576. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.325>
- [99] Kenai, M. A., Libessart, L., Lassue, S., & Defer, D. (2021). Impact of green walls occultation on energy balance: Development of a TRNSYS model on a brick masonry house. *Journal of Building Engineering*, 44, 102634. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102634>
- [100] de Gracia, A., Navarro, L., Coma, J., Serrano, S., Romani, J., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2018). Experimental set-up for testing active and passive systems for energy savings in buildings – Lessons learnt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1014–1026. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.109>
- [101] Randle-Boggis, R. J., White, P. C. L., Cruz, J., Parker, G., Montag, H., Scurlock, J. M. O., & Armstrong, A. (2020). Realising co-benefits for natural capital and ecosystem services from solar parks: A co-developed, evidence-based approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109775. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109775>
- [102] Durga, S., Beckers, K. F., Taam, M., Horowitz, F., Cathles, L. M., & Tester, J. W. (2021). Techno-economic analysis of decarbonizing building heating in Upstate New York using seasonal borehole thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 241, 110890. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.110890>
- [103] Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., & Aste, N. (2022). A novel LCSA-Machine learning based optimization model for sustainable building design-A case study of energy storage systems. *Building and Environment*, 209, 108656. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108656>
- [104] HEART. (2022). The holistic energy and architectural retrofit toolkit. <https://heartproject.eu/>
- [105] Wu, Y., & Zhong, L. (2023). An integrated energy analysis framework for evaluating the application of hydrogen-based energy storage systems in achieving net zero energy buildings and cities in Canada. *Energy Conversion and Management*, 286, 117066. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117066>
- [106] Mehrjerdi, H., Iqbal, A., Rakhshani, E., & Torres, J. R. (2019). Daily-seasonal operation in net-zero energy building powered by hybrid renewable energies and hydrogen storage

- systems. *Energy Conversion and Management*, 201, 112156. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112156>
- [107] Awad, H., & Gül, M. (2018). Load-match-driven design of solar PV systems at high latitudes in the Northern hemisphere and its impact on the grid. *Solar Energy*, 173, 377–397. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.07.010>
- [108] Maestre, V. M., Ortiz, A., & Ortiz, I. (2022). The role of hydrogen-based power systems in the energy transition of the residential sector. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(3), 561–574. <https://doi.org/10.1002/JCTB.6938>
- [109] Mehrjerdi, H. (2020). Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 156, 183–192. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.04.090>
- [110] Reuß, M., Grube, T., Robinius, M., Preuster, P., Wasserscheid, P., & Stolten, D. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy*, 200, 290–302. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.05.050>
- [111] Preuster, P., Papp, C., & Wasserscheid, P. (2017). Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): Toward a hydrogen-free hydrogen economy. *Accounts of Chemical Research*, 50(1), 74–85. https://doi.org/10.1021/ACS.ACCOUNTS.6B00474/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AR-2016-00474U_0009.GIF
- [112] Knosala, K., Kotzur, L., Röben, F. T. C., Stenzel, P., Blum, L., Robinius, M., & Stolten, D. (2021). Hybrid Hydrogen Home Storage for Decentralized Energy Autonomy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(42), 21748–21763. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.04.036>
- [113] Teichmann, D., Stark, K., Müller, K., Zöttl, G., Wasserscheid, P., & Arlt, W. (2012). Energy storage in residential and commercial buildings via Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC). *Energy & Environmental Science*, 5(10), 9044–9054. <https://doi.org/10.1039/C2EE22070A>
- [114] Ashraf, Q. M., Yusoff, M. I. M., Azman, A. A., Nor, N. M., Fuzi, N. A. A., Saharedan, M. S., & Omar, N. A. (2015). Energy monitoring prototype for Internet of Things: Preliminary results. *IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2015 - Proceedings*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WF-IOT.2015.7389157>
- [115] Dave, E. (2011). The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- [116] García-Monge, M., Zalba, B., Casas, R., Cano, E., Guillén-Lambea, S., López-Mesa, B., & Martínez, I. (2023). Is IoT monitoring key to improve building energy efficiency? Case study of a smart campus in Spain. *Energy and Buildings*, 285, 112882. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.112882>
- [117] Li, P., Parkinson, T., Schiavon, S., Froese, T. M., de Dear, R., Rysanek, A., & Staub-French, S. (2020). Improved long-term thermal comfort indices for continuous monitoring. *Energy and Buildings*, 224, 110270. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110270>
- [118] Sovacool, B. K., Hook, A., Sareen, S., & Geels, F. W. (2021). Global sustainability, innovation and governance dynamics of national smart electricity meter transitions. *Global Environmental Change*, 68, 102272. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2021.102272>
- [119] Ouedraogo, K. E., Ekim, P. O., & Demirok, E. (2023). Feasibility of low-cost energy management system using embedded optimization for PV and battery storage assisted residential buildings. *Energy*, 271, 126922. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.126922>
- [120] Putra, R. H. P., Wahyudin, D., & Sucita, T. (2018). Designing Energy and Power Monitoring System on Solar Power Plant Using Raspberry Pi. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 384(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/384/1/012041>
- [121] Batista, N. C., Melício, R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2013). Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid. *Energy*, 49(1), 306–315. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.11.002>
- [122] Jayanth, S., Poorvi, M. B., & Sunil, M. P. (2017). Raspberry Pi based energy management system. *Proceedings of 2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies, IC-GET 2016*. <https://doi.org/10.1109/GET.2016.7916752>

- [123] Aydoğdu, E. (2019, May 6). Mevcut Ticari Binaların Aydınlatma Sistemlerinde Enerjiverimliliği Analizi İçin Örnek Bir Çalışma. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. <http://hdl.handle.net/11527/18230>
- [124] Kaynaklı, O., Unver, U., & Kilic, M. (2003). Evaluating thermal environments for sitting and standing posture. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 30(8), 1179–1188. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(03\)00183-0](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(03)00183-0)
- [125] Aykal, D., Baran, M., Erbaş, M., Hatice, & Gündüz, K. (2022). The Importance of Natural Lighting in the Design of Health Buildings: Sample of Şanlıurfa/Muradiye Family Health Center. *Journal of Current Research on Social Sciences (JoCRESS)*, 7(2), 95–105. <https://doi.org/10.26579/jocress-7.2.17>
- [126] Özkum, E. (2011). Doğal ve yapay aydınlatmanın insan psikolojisi üzerindeki etkileri. Marmara Üniversitesi, İstanbul. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=mqaYoP_VnjHNgPxxk0w90Pg&no=hOd9HzNoIO3M-bGJmuZlbg
- [127] Erkin, E., & Onaygil, S. (2017). Konutlar İçin Yeni Nesil Aydınlatma Kontrol Sistemleri. In EMO - IX. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu Bildirileri. İzmir: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası. Retrieved from https://www.emo.org.tr/etkinlikler/aysem/etkinlik_bildirileri_detay.php?etkinlikkod=271&bil kod=6813
- [128] CSA. (2021, May 11). The Connectivity Standards Alliance. Retrieved March 22, 2023, from <https://csa-iot.org/>
- [129] Demir, H., Çıracı, G., Kaya, R., & Ünver, Ü. (2020). Aydınlatmada Enerji Verimliliği: Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Durum Değerlendirmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1637–1652. <https://doi.org/10.17482/uumfd.795971>
- [130] Erlalitepe, İ., Aral, D., & Kazanasmaz, T. (2011). Eğitim Yapılarının Doğal Aydınlatma Performansı Açısından İncelenmesi. *MEGARON / Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi E-Dergisi*, 6(1), 39–51.
- [131] Erel, B. (2004). Gün Işığı ile Aydınlatma Alanında Geliştirilen Yeni Teknolojiler Hakkında Bir Araştırma. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11527/8638>
- [132] Hazırlar, M. A. (2004). Halk kütüphanelerinde iç mimari. Hacettepe Üniversitesi, Ankara. Retrieved from <http://bby.hacettepe.edu.tr/yayinlar/119.pdf>
- [133] Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., & Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1016–1033. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.03.062>
- [134] Çetegen, D., Enarun, D., Yener, A., & Batman A. (2004). Günışığı yapay ışık entegrasyonu ışık rafı sisteminin incelenmesi. In 5. Ulusal Aydınlatma Kongresi (pp. 15–22). İstanbul. <https://docplayer.biz.tr/11452774-Gunisigi-yapay-istik-entegrasyonunu-saglayan-istik-rafi-sisteminin-incelenmesi-duygu-cetegen-dilek-enarun-alpin-koknel-yener-alp-batman.html>
- [135] UN-Water. (2023). UN World Water Development Report 2023. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023>
- [136] Qin, P., Chen, S., Tan-Soo, J. S., & Zhang, X. B. (2022). Urban household water usage in adaptation to climate change: Evidence from China. *Environmental Science & Policy*, 136, 486–496. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2022.07.019>
- [137] Asano, T., & Levine, A. D. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present, and future. *Water Science and Technology*, 33(10–11), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00401-5](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00401-5)
- [138] Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Hartung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(13–16), 776–785. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2009.07.004>
- [139] Hammes, G., Ghisi, E., & Padilha Thives, L. (2020). Water end-uses and rainwater harvesting: a case study in Brazil. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1748663>
- [140] Zhang, Y., Grant, A., Sharma, A., Chen, D., & Chen, L. (2010). Alternative water resources for rural residential development in Western Australia. *Water Resources Management*, 24(1), 25–36. <https://doi.org/10.1007/S11269-009-9435-0/METRICS>
- [141] Yalılı Kılıç, M., & Abuş, M. N. (2018). Bahçeli Bir Konut Örneğinde Yağmur Suyu Hasadı. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 4(2), 209–215. <https://doi.org/10.24180/IJAWS.426795>
- [142] Üstün, G. E., Can, T., & Küçük, G. (2020). Binalarda Yağmur Suyu Hasadı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*,

- 25(3), 1593–1610.
<https://doi.org/10.17482/UUMFD.765561>
- [143] Beytullah Eren, A. A. S. L. A. I. D. (2016). Yağmur Suyu Hasadı: Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü Örneği. 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016) 3-5 Nov 2016 Alanya/Antalya - Turkey.
- [144] Herrmann, T., & Schmida, U. (2000). Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*, 1(4), 307–316.
[https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00024-8)
- [145] Strangeways, I. (2006). Precipitation: Theory, measurement and distribution. *Precipitation: Theory, Measurement and Distribution*, 9780521851176, 1–290.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511535772>
- [146] Pradhan, R., & Sahoo, J. (2019). Smart Rainwater Management: New Technologies and Innovation. *Smart Urban Development*.
<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.86336>
- [147] Farah, E., & Shahrour, I. (2017). Smart water for leakage detection: Feedback about the use of automated meter reading technology. *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies, SENSET 2017*, 2017-January, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/SENSET.2017.8125061>
- [148] Depuru, S. S. S. R., Wang, L., & Devabhaktuni, V. (2011). Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2736–2742.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.02.039>
- [149] Zorzi, M., Gluhak, A., Lange, S., & Bassi, A. (2010). From today's INTRANet of things to a future INTERNet of things: A wireless- and mobility-related view. *IEEE Wireless Communications*, 17(6), 44–51.
<https://doi.org/10.1109/MWC.2010.5675777>
- [150] Benavente-Peces, C. (2019). On the Energy Efficiency in the Next Generation of Smart Buildings—Supporting Technologies and Techniques. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 4399, 12(22), 4399.
<https://doi.org/10.3390/EN12224399>
- [151] Sain, M., Kang, Y. J., & Lee, H. J. (2017). Survey on security in Internet of Things: State of the art and challenges. *International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, 699–704.
<https://doi.org/10.23919/ICACTION.2017.7890183>
- [152] Sanchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2016). State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. *Sensors* 2016, Vol. 16, Page 708, 16(5), 708.
<https://doi.org/10.3390/S16050708>
- [153] Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67.
<https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
- [154] Andrić, I., Vrsalović, A., Perković, T., Aglič Čuvic, M., & Šolić, P. (2022). IoT approach towards smart water usage. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133065.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133065>
- [155] LoRa Alliance. (2020). LoRaWAN Technical Committee.
- [156] Berni, A. J., & Gregg, W. D. (1973). On the utility of chirp modulation for digital signaling. *IEEE Transactions on Communications*, 21(6), 748–751.
<https://doi.org/10.1109/TCOM.1973.1091721>
- [157] Kordana-Obuch, S., Starzec, M., & Słyś, D. (2021). Assessment of the Feasibility of Implementing Shower Heat Exchangers in Residential Buildings Based on Users' Energy Saving Preferences. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 5547, 14(17), 5547.
<https://doi.org/10.3390/EN14175547>
- [158] Stec, A., Kordana, S., & Słyś, D. (2017). Analysing the financial efficiency of use of water and energy saving systems in single-family homes. *Journal of Cleaner Production*, 151, 193–205.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.071>
- [159] Bartkowiak, S., Fisk, R., Funk, A., Hair, J., & Skerlos, S. J. (2010). Residential Drain Water Heat Recovery Systems: Modeling, Analysis, and Implementation. *Journal of Green Building*, 5(3), 85–94.
<https://doi.org/10.3992/JGB.5.3.85>
- [160] Manouchehri, R., & Collins, M. R. (2018). An experimental analysis of the impact of unequal flow on falling film drain water heat recovery system performance. *Energy and Buildings*, 165, 150–159.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.01.018>
- [161] Manouchehri, R., & Collins, M. R. (2020). Modelling the Steady-State Performance of Coiled Falling-Film Drain Water Heat Recovery Systems Using Rated Data. *Resources* 2020, Vol. 9, Page 69, 9(6), 69.
<https://doi.org/10.3390/RESOURCES9060069>
- [162] Piotrowska, B., & Słyś, D. (2023). Variant analysis of financial and energy efficiency of

- the heat recovery system and domestic hot water preparation for a single-family building: The case of Poland. *Journal of Building Engineering*, 65, 105769. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105769>
- [163] Zargari, S. S. (2016). Binalarda Rüzgâr Bacası ve Enerji Verimliliği. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 8(30), 85–101. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iaud/issue/30078/324642>
- [164] Haseh, R. H., Khakzand, M., & Ojaghlo, M. (2018). Optimal Thermal Characteristics of the Courtyard in the Hot and Arid Climate of Isfahan. *Buildings* 2018, Vol. 8, Page 166, 8(12), 166. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS8120166>
- [165] Çetintaş, K. F., & Rezafar, A. (2022). Binalarda Pasif Soğutma Yöntemleri ve Geleneksel Mimarideki Uygulamalarının İncelenmesi. *KAPU Trakya Mimarlık ve Tasarım Dergisi*, 2(2), 37–56. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kapu/issue/73706/1113196>
- [166] Melikoğlu, Y., & Bekleyen, A. (2021). Şanlıurfa'nın Geleneksel Rüzgâr Yakalayıcıları: Kaybolan Bir Geleneğin Günümüze Kadar Gelen Örnekleri. *El-Cezeri*, 8(1), 268–286. <https://doi.org/10.31202/ECJSE.835131>
- [167] Mandalaki, M., Zervas, K., Tsoutsos, T., & Vazakas, A. (2012). Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy*, 86(9), 2561–2575. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2012.05.026>
- [168] Alkhayyat, J. (2013). Design Strategy for Adaptive Kinetic Patterns: Creating a Generative Design for Dynamic Solar Shading Systems. University of Salford. https://www.academia.edu/6978438/Design_strategy_for_adaptive_kinetic_patterns_creating_a_generative_design_for_dynamic_solar_shading_system
- [169] Cilento Karen. (2012). Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas. *ArchDaily*. <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas>
- [170] Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467–490. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.06.023>
- [171] EİGM. (2022). Türkiye Ulusal Enerji Planı. [172] EPDK. (2022). 2021 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu. Ankara.
- [173] ETKB. (2023). Elektrik. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- [174] TÜİK. (2022). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları 2021.
- [175] ETKB. (2022). 2021 Ulusal Enerji Denge Tablosu - Orijinal Birimler / Bin TEP. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>
- [176] IICEC. (2020). Turkey Energy Outlook 2020. <https://iicec.sabanciuniv.edu/tr/teo>
- [177] TÜİK. (2023). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2021.
- [178] Huang, B. N., Hwang, M. J., & Yang, C. W. (2008). Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach. *Ecological Economics*, 67(1), 41–54. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2007.11.006>
- [179] Erdal, G., Erdal, H., & Esengün, K. (2008). The causality between energy consumption and economic growth in Turkey. *Energy Policy*, 36(10), 3838–3842. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2008.07.012>
- [180] Yurdakul, F. (2018). The Relationship between Energy Consumption per Capita and Growth Rate: The Case of Turkey. *Ekonomik Yaklaşım*, 29(107), 49. <https://doi.org/10.5455/EY.39112>
- [181] Aydın, K., Taşçı, H., Ağırlioğlu, S., & Sönmüş, A. (2021). Performance of Energy Efficiency in Turkey. *Euroasia Journal of Social Sciences & Humanities*, 8(19), 156–166. <https://doi.org/10.38064/EURSSH.203>
- [182] Bertoldi, Paolo., Rezessy, Silvia., & European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2006). Tradable Certificates for Energy Savings (White Certificates) - Theory and Practice. Publications Office. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC32865>
- [183] Naimoğlu, M., & Akal, M. (2021). Enerji Verimliliği Üzerine Arz ve Talep Yönlü Genel Bir Bakış. *Verimlilik Dergisi*, (3), 3–20. <https://doi.org/10.51551/VERIMLILIK.698615>
- [184] Alanlı, A. (2022). Türkiye’de Enerji Verimliliğine Yönelik Politikaların Değerlendirilmesi. *Şırnak Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1–18. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sufbd/issue/73123/1062139>

- [185] Türkoğlu, S. P., & Kardoğan, P. S. Ö. (2018). The role and importance of energy efficiency for sustainable development of the countries. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 7, 53–60. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64349-6_5
- [186] IEA. (2022). *Global energy intensity, 1990 vs. 2019*.
- [187] Subramanian, S., Bastian, H., Hoffmeister, A., Jennings, B., Tolentino, C., Vaidyanathan, S., & Nadel, S. (2022). *2022 International Energy Efficiency Scorecard*. Washington. <https://www.aceee.org/research-report/i2201>
- [188] Koçaslan, G. (2014). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Mevzuatı, Avrupa Birliği'ndeki Düzenlemeler ve Uluslararası-Ulusal Öneriler. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 15(2), 117–133. <http://search/yayin/detay/175615>
- [189] Yağcı, B. E., & Sözen, A. (2023). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Etkinlik Analizi. *Politeknik Dergisi*, 1–1. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.859790>
- [190] CSB. (2018). *Binalar İçin Isı Yalıtımı Bir Zorunluluk Mudur?* <https://yalova.csb.gov.tr/binalar-icin-isi-yalitimi-bir-zorunluluk-mudur-haber-226222>
- [191] ETKB. *Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik*, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2020).
- [192] TMMOB. (2022). *Türkiye'nin Enerji Görünümü 2022*.
- [193] SBB. (2019). *On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)*. Ankara.
- [194] TÜİK. (2022). *Nüfus ve Konut Sayımı, 2021*.
- [195] TÜİK. (2022). *Bina ve Konut Nitelikleri Araştırması, 2021*.
- [196] Aydın, Ö. (2019). Binalarda Enerji Verimliliği Kapsamında Yapılan Projelerin Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği. *Mimarlık ve Yaşam*, 4(1), 55–68. <https://doi.org/10.26835/MY.511825>
- [197] Özcan, K. M., Gülay, E., & Üçdoğruk, Ş. (2013). Economic and demographic determinants of household energy use in Turkey. *Energy Policy*, 60, 550–557. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.05.046>
- [198] Emeç, H., Altay, A., Aslanpay, E., & Özdemir, M. O. (2015). Türkiye'de Enerji Yoksulluğu ve Enerji Tercihi Profili. *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, (608), 9–21. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fpeyd/issue/4803/9/607516>
- [199] Çelik, A. K., & Oktay, E. (2019). Modelling households' fuel stacking behaviour for space heating in Turkey using ordered and unordered discrete choice approaches. *Energy and Buildings*, 204, 109466. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109466>
- [200] Selçuk, İ. Ş., Gölçek, A. G., & Köktaş, A. M. (2019). Energy Poverty in Turkey. *Sosyoekonomi*, 27(42), 283–299. <https://doi.org/10.17233/SOSYOEKONOMI.2019.04.15>
- [201] İpek, Ö., & İpek, E. (2022). Determinants of energy demand for residential space heating in Turkey. *Renewable Energy*, 194, 1026–1033. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.05.158>
- [202] Ritchie, H., & Roser, M. (2022). *Indoor Air Pollution*. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/indoor-air-pollution>
- [203] Etem Gürel, A. (2011). Farklı dış duvar yapıları için optimum ısı yalıtım kalınlığı tespitinin ekonomik analizi. *Sakarya University Journal of Science*, 15(1), 75–81. <https://doi.org/10.16984/SAUFBED.80287>
- [204] İşbilir, & Derya. (2009). Binalarda ısı yalıtımı uygulamaları ve sorunlarının araştırılması. <http://acikerisim.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/8213>
- [205] Kaynaklı, Ö., Ünver, Ü., Kılıç, M., & Yamankaradeniz, R. (2003). Sürekli Rejim Enerji Dengesi Modeline Göre Isıl Konfor Bölgeleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 23–30. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/2052/9/218665>
- [206] Seppänen, O., Fisk, W. J., Lei, Q. H., Org, E., & Seppänen, O. (2006). *Room Temperature and Productivity in Office Work*. <http://www.hut.fi>
- [207] Ünver, Ü., Adigüzel, E., Adigüzel, E., Çivi, S., & Roshanaei, K. (2020). Türkiye'deki İklim Bölgelerine Göre Binalarda Isı Yalıtım Uygulamaları. *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 171–187. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/imctd/issue/5937/2/805008>
- [208] Şenkal Sezer, F. (2005). Türkiye'de Isı Yalıtımının Gelişimi ve Konutlarda Uygulanan Dış Duvar Isı Yalıtım Sistemleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 10(2). <https://doi.org/10.17482/UJFE.63488>
- [209] Cengel, Y. A. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach*. McGraw-Hill. <https://www.abebooks.com/9780072458930/H>

- eat-Transfer-Practical-Approach-Cengel-0072458933/plp
- [210] Gürlek, G., Özbalta, N., Yıldız, A., & Erkek, M. (2008). Economical and environmental analysis of thermal insulation thickness in buildings. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28(2), 25–34. <http://search/yayin/detay/81511>
- [211] Kurekci, N. A. (2016). Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers. *Energy and Buildings*, 118, 197–213. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.03.004>
- [212] OeEB. (2013). Energy Efficiency Potential Country Report: TURKEY. Allplan GmbH.
- [213] Causone, F., Pietrobon, M., Pagliano, L., & Erba, S. (2017). A high performance home in the Mediterranean climate: From the design principle to actual measurements. *Energy Procedia*, 140, 67–79. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.11.124>
- [214] Hopfe, C., & McLeod, R. (2015). The Passivhaus Designer's Manual: A technical guide to low and zero energy buildings. The Passivhaus Designer's Manual. <https://doi.org/10.4324/9781315726434>
- [215] Schnieders, J., Eian, T. D., Filippi, M., Florez, J., Kaufmann, B., Pallantzas, S., ... Yeh, S. C. (2020). Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones. *Energy Efficiency*, 13(8), 1561–1604. <https://doi.org/10.1007/S12053-019-09819-6>
- [216] Passivhaus Institut. (2023). The Passive House Institute - Who we are and what we do. https://passivehouse.com/01_passivehouseinstitute/01_passivehouseinstitute.htm
- [217] Aşıkoğlu, A., Altın, M., & Seval BAYRAM, N. (2021). Pasif Ev Sertifika Sisteminin Mevcut Binalarda Uygulanması: EnerPHit Sertifika Sistemi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(5), 1146–1156. <https://doi.org/10.35414/AKUFEMUBID.978242>
- [218] Köse Mutlu, B. (2021). Çok Katlı Binalarda Gri Suyun Yerinde Arıtılması ile Yeniden Kullanılmasının Fizibilitesi: İstanbul'da Bir Kentsel Dönüşüm Projesi Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 81–91. <https://doi.org/10.21205/DEUFMD.2021236707>
- [219] Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., & Judd, S. (2004). Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Science and Technology*, 50(2), 157–164. <https://doi.org/10.2166/WST.2004.0113>
- [220] Ottoson, J., & Stenström, T. A. (2003). Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. *Water research*, 37(3), 645–655. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00352-4)
- [221] Winward, G. P., Avery, L. M., Frazer-Williams, R., Pidou, M., Jeffrey, P., Stephenson, T., & Jefferson, B. (2008). A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse. *Ecological Engineering*, 32(2), 187–197. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2007.11.001>
- [222] Jamrah, A., Al-Omari, A., Al-Qasem, L., & Ghani, N. A. (2011). Assessment of availability and characteristics of Greywater in Amman. *31(2)*, 210–220. <https://doi.org/10.1080/02508060.2006.9709671>
- [223] Onaygil, S. (2013). Aydınlatmada Enerji Verimliliği: LED Teknolojisi. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 29–31. https://www.emo.org.tr/ekler/e314dc0affda638_ek.pdf?dergi=910
- [224] Kocaman, B. (2020). Kapalı Otopark Aydınlatmasında Floresan ve LED Lambanın Enerji Verimliliği Açısından Karşılaştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), 1640–1648. <https://doi.org/10.21597/JIST.670665>
- [225] Coşkun, C., & Oktay, Z. (2010). Enerji Tasarrufu Perspektifinde Bir Kampüs Binasının Enerji Taraması Çalışması. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*. <https://www.mmo.org.tr/ocak-subat2010/makale/enerji-tasarrufu-perspektifinde-bir-kampus-binasinin-enerji-taramasi-calismasi>
- [226] Altınöz, M., & Mıhlayanlar, E. (2019). Aktif Güneş Sistemlerinin Bina Enerji Verimliliği Üzerindeki Katkısının İncelemesi. *Mimarlık ve Yaşam*, 4(2), 323–335. <https://doi.org/10.26835/MY.635052>
- [227] Ülker, S. (2009, February 20). Isı Yalıtım Malzemelerinin Özelliklerinin Uygulamaya Etkileri. <http://hdl.handle.net/11527/8195>
- [228] Gençoğlu Korkmaz, G., & Samancı, A. (2022). Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesine Ait Binalar İçin Enerji Verimliliğini Artırmaya Yönelik Örnek Bir Çalışma. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 442–456. <https://doi.org/10.36306/KONJES.1089881>

- [229] Ucar, A., & Balo, F. (2009). Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey. *Applied Energy*, 86(5), 730–736. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2008.09.015>
- [230] Güğül, G. N., & Köksal, M. A. (2019). Müstakil bir konutun enerji tüketiminin azaltılmasında kullanılan yöntemlerinin ekonomik değerlendirmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 215–234. <https://doi.org/10.17341/GAZIMMFD.416483>
- [231] Çomaklı, K., & Yüksel, B. (2003). Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. *Applied Thermal Engineering*, 23(4), 473–479. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00209-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00209-0)
- [232] Kılıçlı, A. (2018). Ege Üniversitesi bünyesindeki mevcut bir binanın enerji-ekserji analizi ve iyileştirme önerileri. *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=G01z7w-G16td9lw9ABjqng&no=_uJ54PQaowEb38CHYsdKNQ
- [233] Yürük, M., İbrahim Variyenli, H., Martin, K., Khanlari, A., & Aytaç, İ. (2022). Bireysel Isıtma Sistemlerinde Tesisat Temizliğinin Enerji Verimliliği Açısından Deneysel Olarak Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 25(3), 1375–1384. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.1025494>
- [234] Karaçam, T., İbrahim Variyenli, H., Martin, K., Khanlari, A., & Aytaç, İ. (2022). Termostatik Radyatör Vanası Kullanımının Binalarda Enerji Verimliliği Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1713–1721. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.1031156>
- [235] Koç, Ü. (2020). Sektörel Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi*, 55(1), 508–521. <https://doi.org/10.15659/3.SEKTOR-SOSYAL-EKONOMI.20.03.1289>
- [236] Demirsoy, G., & Sözen, A. (2023). Binalarda Enerji Verimliliğinin Toplam Faktör Etkinliği. *Politeknik Dergisi*, 1–1. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.886923>
- [237] Omar, A. I., Khattab, N. M., & Abdel Aleem, S. H. E. (2022). Optimal strategy for transition into net-zero energy in educational buildings: A case study in El-Shorouk City, Egypt. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101701. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101701>
- [238] Fiaschi, D., Bandinelli, R., & Conti, S. (2012). A case study for energy issues of public buildings and utilities in a small municipality: Investigation of possible improvements and integration with renewables. *Applied Energy*, 97, 101–114. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.03.008>
- [239] Erhorn, H., Mroz, T., Mørck, O., Schmidt, F., Schoff, L., & Thomsen, K. E. (2008). The Energy Concept Adviser—A tool to improve energy efficiency in educational buildings. *Energy and Buildings*, 40(4), 419–428. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.03.008>
- [240] Kaklauskas, A., Zavadskas, E. K., Raslanas, S., Ginevicius, R., Komka, A., & Malinauskas, P. (2006). Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case. *Energy and Buildings*, 38(5), 454–462. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2005.08.005>
- [241] Balaras, C. A., Gaglia, A. G., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., & Lalas, D. P. (2007). European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Building and Environment*, 42(3), 1298–1314. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.11.001>
- [242] Herrando, M., Chordá, R., Gómez, A., & Fueyo, N. (2023). The cost overrun of depopulation to improve energy efficiency in buildings: A case study in the Mediterranean Region. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102985. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102985>