



KFBD

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi

The Black Sea Journal of Sciences

ISSN (Online): 2564-7377 <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kfbd>

Araştırma Makalesi / Research Article

Eko Tasarım Yaklaşımıyla Mesken Isıtma Uygulaması

Buğra ŞENSOY^{1*}, Mustafa AKTAŞ²

Öz

Günümüzde oldukça popüler olan enerji mimarisi kavramına bağlı olarak eko tasarım uygulamaları ve yeşil bina sertifikaları günden güne prestij kazanmaktadır. Bu sertifikaların alınabilmesi için, yapılarda tüketilen enerjinin yerinde ve yenilenebilir enerji teknolojileri ile üretilerek fosil yakıtların kullanımının sınırlandırılması gerekmektedir. Bunun yanında, sertifika alım sürecinde, enerjinin etkin ve verimli kullanılabilmesi konusunda ısı yalıtımı süreçleri de ön plana çıkmaktadır. Ayrıca bu çalışma yukarıdaki kriterler dahilinde, nSEB kapsamında inşa edilecek binalar için örnek bir uygulama mahiyetini de taşımaktadır. Yapılan bu çalışmada Ankara iklim şartlarında yer alan bir villanın etkin enerji verimliliği süreci için TS 825 "Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" standardına bağlı kalınarak ısı yalıtımı yapılmış ve villanın ısıtma sezonunda ihtiyaç duyacağı ısıtma yükü hesaplanmıştır. Normal koşullarda mahal ısıtma ve kullanım sıcak suyu için gaz yakıcı cihaz kullanılan villada, PV/T paneller desteği ile yeni nesil bir ısıtma sistemi tasarımı yapılmış ve ısı pompası sistemi kullanılmıştır. Yapılan tasarımda evaporasyon ve kondenzasyon sıcaklıkları sırasıyla 10°C ve 50°C olarak kabul edilerek sistemde R410A soğutucu akışkanı kullanılmıştır. Güneş enerjisi destekli bu ısı pompası tasarımının COP değeri 4,65 olarak hesaplanmıştır. Isıtma sezonunda villanın mahal ısıtma ve kullanım sıcak suyu için ihtiyacı olan 1.345,88 kWh enerjinin %39,60'sında gaz yakıcı cihaza gereksinim duyulmadan tek başına PV/T destekli ısı pompası sistemi enerji ihtiyacını karşılamış, ısıtma sezonu boyunca tasarruf edilen doğalgaz miktarı 426,37 m³, bu miktarın ekonomik karşılığı ise 2.579,41 ₺ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca doğalgaz tüketiminde yaşanan azalma ile yılda 0,861 ton CO₂ salınımının önüne geçildiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Eko tasarım, Fotovoltaik termal panel, Isı pompası, Yeşil bina sertifikası, Neredeyse sıfır enerjili bina.

Residential Heating Application with Eco Design Approach

Abstract

In line with the prevalent concept of energy architecture, eco-design applications, and green building certifications are gaining increasing prestige day by day. To qualify for these certifications, the energy consumed in buildings must be produced on-site using renewable energy technologies, and the use of fossil fuels must be restricted. Additionally, during the certification process, thermal insulation processes take precedence concerning the effective and efficient use of energy. Furthermore, this study serves as an exemplary application for buildings to be constructed within the scope of nSEB, adhering to the above criteria. In this study, focusing on the effective energy efficiency of a villa in Ankara's climate conditions, thermal insulation was implemented according to the TS 825 "Heat Insulation Rules in Buildings" standard, and the heating load required during the villa's heating season was calculated. In the villa where a gas-burning device is typically used for space heating and domestic hot water under normal conditions, a new-generation heating system, supported by PV/T panels, was designed, and a heat pump system was employed. In the design, evaporation and condensation temperatures were set at 10°C and 50°C, respectively, with R410A refrigerant used in the system. The COP of this solar-integrated heat pump system was calculated as 4.65. The PV/T supported heat pump system alone met 39.60% of the villa's energy needs for space heating and domestic hot water, eliminating the need for a gas-burning device. The amount of natural gas saved during the heating season was calculated as 426.37 m³, with an economic equivalent estimated at 2,579.41 ₺. Moreover, it was determined that a reduction in natural gas consumption prevented 0.861 tons of CO₂ emissions annually.

Keywords: Energy efficiency, Eco design, Photovoltaic thermal panel, Heat pump, Green building certification, Nearly zero-energy building.

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, Türkiye, bugra.sensoy@gazi.edu.tr

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, Türkiye, mustafaaktas@gazi.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Endüstrinin hızlı ilerleyişi, nüfus artışı ve insanoğlunun tüketim alışkanlıklarında yaşanan artışın temelini oluşturduğu enerji ihtiyacının yükseliş trendi, ülkelerin enerji politikalarını geliştirmesi ve dönüştürmesine yol açmaktadır. Özellikle Türkiye gibi enerji kaynaklarında ithalat yapması gereken ülkelerde, bu durum arz güvenliği ve enerji kaynağı çeşitlendirmesi açısından oldukça önemli bir hale gelmiştir. Ortaya konulacak olan politikaların aynı bir piramit gibi aşağıdan yukarıya dengeli bir profil göstermesi oldukça önemlidir. Bu beisle, enerjinin konutlarda bireysel kullanımından başlayarak en yoğun kullanıldığı sanayi kuruluşlarına kadar sürdürülebilir bir yapı kurulması gerekmektedir.

Ülkelerin gelişimi açısından son derece kritik olan sürdürülebilirlik kavramı enerji sektörü için de hayati bir değer taşımaktadır. Enerji sektöründe sürdürülebilirlik kavramının altının dolu şekilde gelişmesi için, üretimi ve tüketimi yapılan her türlü enerji çeşidinin; uygun fiyatlı, çevreye duyarlı ve her daim ulaşılabilir olması gerekmektedir. Bu kavram yalnızca büyük ölçekte değil hane halkı düzeyinde de planlanmalıdır.

Konutlarda enerji verimliliği açısından sürdürülebilir bir yapı oluşturmak için, enerji mimarisi kavramının etkin olarak kullanılması gerekmektedir. Etkin bir enerji mimarisi için, enerji verimliliği performansı yüksek ve konutlarda yenilenebilir enerji kaynaklarının mümkün olduğunca fazla şekilde kullanımını destekleyecek tasarımlar ortaya konulmalıdır. Bu kriterler ile, son zamanlarda oldukça popüler hale gelen ve kullanımı günden güne artan yeşil bina sertifikalarının alınması da sağlanacaktır.

Türkiye'nin Avrupa Parlamentosu ile ortak olarak yürüttüğü süreçler kapsamında gündeme gelen ve uygulamalara başlayan "Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (nSEB)" çalışması kapsamında ortaya konulan direktiflerde; 31 Aralık 2020'den tarihinden sonra inşa edilen binaların nSEB amaçlarına göre ısıtılması veya soğutulması gerektiği öngörülmektedir. Bu binaların tasarımı için dikkat edilmesi gereken en temel hususlar; binanın oldukça düşük miktarda enerji tüketmesi, kullandığı enerjiyi de yerinde üreterek yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamasıdır. Özellikle Kuzey Avrupa başta olmak üzere birçok Avrupa ülkesinde nSEB uygulamaları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu kapsamda Türkiye'nin ortaya koymuş olduğu hedeflerin uygulanması açısından; yapılan bu çalışma ile ülkemiz inşaat sektörüne örnek olacak bir yapı ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Yukarıda önemine dikkat çekilen hususları kapsamaması amaçlanan bu çalışma ile ortaya konulan tasarımda; Ankara ilinde bulunan bir villada, mahal ısıtma ve kullanım sıcak suyu temini için kullanılan doğalgazın tüketiminin azaltılması maksadıyla, enerji verimliliği çalışmaları kapsamında TS 825 "Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" standardı referans alınarak etkin bir ısı yalıtımı yapılmış ve

PV/T paneller ile desteklenen ısı pompası sistemi kullanılmıştır. Isı pompası sistemiyle, mümkün olan en yüksek oranda ısıtma sürecinde herhangi bir tedarikçiye bağlı kalınmaksızın bağımsız enerji kullanımı amaçlanırken, ısı pompası sistemine entegre edilen PV/T paneller ile de tüketim dahilinde herhangi bir mali fatura gerektirmeyen, tüketim yerinde üretim imkânı sunan ve çevreye duyarlı kaynaklar bütünü olan “yenilenebilir enerji” ısıtma sürecine dahil edilmiştir. Bu sayede yeşil bina sertifika alım sürecini kolaylaştıracak kriterler tasarım bütününe yayılarak, çeşitli sektörlerde yer alan paydaşlara örnek bir sistem tasarımı ortaya konulmuştur.

Binalarda ısı yalıtımı, güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri ve nSEB uygulamaları ile ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalara bu kısımda yer verilmiştir. İlk olarak, binalarda yaşanan ısı kayıpları ve gerçekleştirilen ısı yalıtımı süreci ile ilgili olarak literatürde yer alan bazı önemli çalışmalara aşağıda yer verilmiştir;

Tıkız (2018), Türkiye’deki enerji tüketiminin %35’inin binalardan kaynaklandığını ve bu oranın %80’inin de ısıtma amacıyla kullanıldığını belirtmiştir. Elhuveydi ve Oral (2022), bir binada ısı kaybı araştırması yapmış olduğu çalışmasında, yapı bileşenleri arasında en fazla ısı kaybı yaratan noktaların %57,4 ile pencereler olduğu ısı kayıplarını azaltmak ve dolayısıyla enerji verimliliğini arttırarak ısıtma maliyetini düşürmek için özellikle; pencere, dış duvar ve dış kapıların yalıtım ve sızdırmazlık problemlerinin giderilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Jain ve arkadaşları (2018), binalarda enerji tüketiminin azaltılmasına ilişkin yapmış oldukları deneysel çalışmada, Hindistan’da üç katlı bir binanın çatı ve duvar cephelerine güneş panelleri yerleştirmiş ve %25 oranında ısı tasarrufu sağlandığını gözlemlemişlerdir. Rüşen ve arkadaşları (2018), yeşil bina tasarımları içerisinde yer alan “Yeşil Üniversite” çalışmalarına ilişkin Türkiye’de bir üniversite kampüsünde verimlilik potansiyeli çalışmalarında bulunmuşlardır. Binaların ısı yalıtımı ve çevreci enerji üretim yöntemlerini de içerisine alan bu çalışmada, üniversite kampüsünün %18’lik tasarruf potansiyelinin olduğu, bu değerın 268,5 TEP enerjiye karşılık geleceği ve bu tasarruf ile yaklaşık 1001 ton CO₂ salımının önüne geçileceği vurgulanmıştır.

Ortaya konulan tasarımın en önemli noktalarından birisi olan güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleriyle ilgili olarak literatürde yer alan bazı önemli çalışmalara aşağıda yer verilmiştir;

Gül ve Akyüz (2019), yapmış oldukları çalışmada Balıkesir iklim şartlarında PV/T sıvı kolektörün elektriksel ve termodinamik verimliliklerini deneysel olarak incelemişleridir. Farklı debilerde termodinamik verimin %49,9-52,1 arasında değişkenlik gösterdiği, elektriksel verimin ise %12 olduğu ancak panele soğutmanın yapıldığı durumlarda verim değerinin %0,9 artış gösterebileceği belirtilmişlerdir. Zhang ve arkadaşları (2019), Çin’in Pekin şehrinde müstakil bir evin ısıtılması amacıyla PV/T destekli ısı pompası sistemi için bir simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada gerçekleştirilen tasarımla, PV/T desteği sayesinde ısıtma sezonunda enerji tüketiminin %13,1 azaldığı ve doğrudan PV kullanılan durumu göre ise elektrik

enerjisi üretiminin %14,7 oranında arttığı sonuçlarına ulaşmışlardır. Wang ve arkadaşları (2015), toprak kaynaklı bir ısı pompası sistemini güneş enerjisiyle destekledikleri bir çalışmayı simüle etmişlerdir. Simüle edilen ortam, Çin'e bağlı Tianjin şehrinde bir ofisin kış şartlarında ısıtılması olup yapılan simülasyon çalışması sonucunda güneş enerjisi destekli toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin COP değeri aylara bağlı olarak 4,28 ile 4,36 arasında değişkenlik göstermiştir. Öztürk yapmış olduğu çalışmada (2021), kullanım sıcak suyunun elde edilmesi amacıyla; elektrikle ısıtma, PV/T destekli ısıtma ve PV/T destekli ısı pompası ile ısıtma yöntemlerini simüle etmiş ve PV/T destekli ısı pompası ile ısıtma yönteminin daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşmıştır. PV/T destekli ısı pompası ile ısıtma yöntemini Hakkâri ve Trabzon iklim şartlarında simüle edilen çalışmada her iki iklim şartı için sırasıyla %68 ve %22,3 enerji verimine ulaşılmıştır. Ayrıca çalışmada yıllık enerji tüketim maliyetleri Hakkâri ve Trabzon illeri için sırasıyla 67,14 \$ ve 135,75 \$ olarak hesaplanmıştır. Chow ve arkadaşları (2012), yapmış oldukları çalışmada farklı iklim şartlarındaki spor salonlarında kullanım sıcak suyunun ısıtılması amacıyla PV/T destekli ısı pompası sistemini modelleyerek analiz etmişlerdir. Yapılan analiz sonucunda, en yüksek COP değeri 4,1 olarak Hong Kong iklim şartlarında elde edilmiş ve %67'ye kadar enerji tasarrufu elde edilebileceği belirtilmiştir. Li ve Sun (2018), Çin'in Qinhuangdao şehri iklim koşullarında, PV/T destekli hava kaynaklı ısı pompası sistemi sıcak su ısıtılmasına ilişkin deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Yapılan çalışmada geleneksel ısı pompası sistemine göre maliyetin yaklaşık %71,1 oranında fazla olduğu, sistemin mevsimsel ortalama COP değerinin 3,10 olduğu ve sistemin birim enerji tüketiminin 0.009 kW h/L olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır. Wang ve arkadaşları (2017), evlerde PV/T destekli ısı pompası sistemi kullanımına ilişkin bir tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Yapılan tasarım, kışın ısıtma, yazın soğutma, sıcak su üretimi gibi farklı modlarda çalışabilen bir yapıya sahiptir. Yapılan çalışmada PV/T paneller sırasıyla su kaynaklı ısı pompası ve su-hava kaynaklı ısı pompasına entegre edilmiştir. Çin'in Pekin ili iklim şartlarında sistem ısıtma modunda iken COP değerleri sırasıyla 3,18 ve 2,53 olarak hesaplanmıştır. Zhou ve arkadaşları (2020) yapmış oldukları çalışmada, 10 kW ısıtma yüküne sahip, 150 m²'lik bir alanı ısıtmak için PV/T destekli ısı pompası sistemi kullanmışlardır. Mahal sıcaklığı 18,5 °C'de sabit tutulmaya çalışılmış, dış hava ise kasım ayı boyunca 6 ile 15 °C arasında değişkenlik göstermiştir. PV/T sistemin termal verimi %56,6; elektriksel verimi %13,1 olup ısı pompası sisteminin COP değeri 4,7 olarak hesaplanmıştır.

Binalarda enerji performansı iyileştirme politikaları kapsamında ortaya konulan neredeyse sıfır enerjili binalar (nSEB) uygulamasına yönelik olarak literatürde yer alan bazı önemli çalışmalara aşağıda yer verilmiştir;

Jaysawal ve arkadaşları (2022), nSEB yaklaşımına ilişkin yapmış oldukları çalışmada, küresel bazda 2014 ile 2035 seneleri arasında inşaat ve bina yenileme sektöründe yaklaşık %44,5 oranında bir artış beklendiğini ve bu artış beklentisinin nSEB yaklaşımının gün geçtikçe daha popüler hale

gelmesine yol açacağını vurgulamışlardır. Irulegi ve arkadaşları (2017), İspanya'nın Bask bölgesinde bir üniversitede yaptıkları nSEB çalışmasında, farklı önlem ve eklemlerinin enerji tüketimine etkisi araştırmışlardır. Çalışmada, havalandırma ve aydınlatma sistemlerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiş ve sisteme yenilenebilir enerji eklemesi yapılmıştır. Bu yöntemler sırasıyla enerji tüketiminde; %23, %5 ve %44 oranlarında azalma sağlamıştır. Dehwah and Asif (2017), Suudi Arabistan'ın Al-Khobar şehrinde yaptıkları nSEB çalışması kapsamında, bir bina üzerine verimi %15,2 olan güneş panelleri konumlandırmışlardır. Çalışmada, güneş panelleri bina çatısının %25'ine konumlandırılmış ve elektrik talebini %19 oranında azalmıştır. Şehirde mevcut olan bina sayısının yaklaşık 33.000 olduğu, aynı verim ve şartlarda bina çatılarında 797 GWh enerji üretim potansiyelinin olduğu tahmin edilmiş ve bu rakamın nSEB yaklaşımı için oldukça değerli olduğu vurgulanmıştır. Lazzarin (2020), son zamanlarda yapılan nSEB çalışmalarında PV/T desteği ile çalışan toprak ve hava kaynaklı ısı pompası sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı ifade etmiştir.

Yapılan bu çalışma ile;

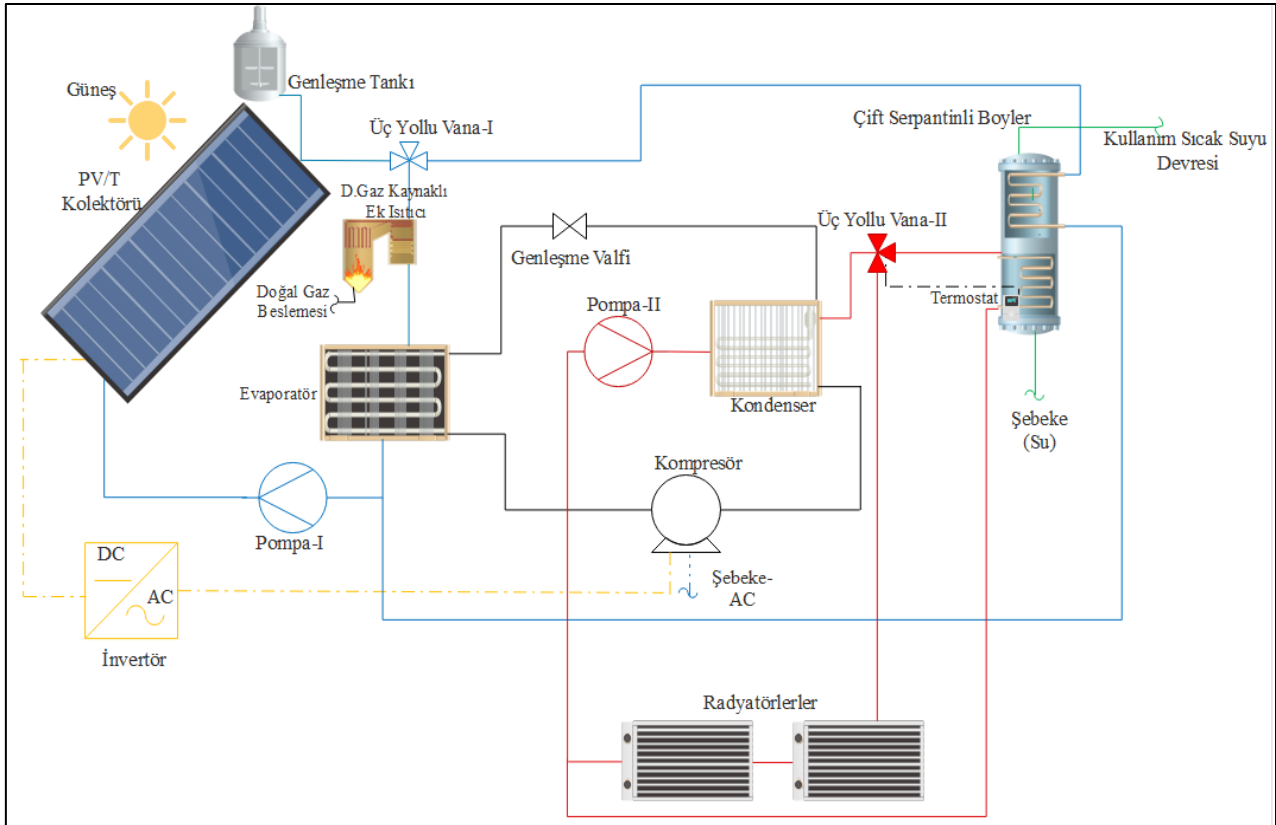
- PV/T destekli ısı pompası sistemiyle eko tasarım yaklaşımına uygun bir şekilde mesken mahallerinin ısıtılması ve sıcak su ihtiyacının karşılanması,
- Isı pompası sistemi sayesinde gaz yakıcı cihazın kullanım süresinin azalmasına bağlı olarak doğalgaz tüketiminin azaltılması,
- Doğalgaz tüketiminin azaltılmasıyla karbon salınımını da azaltan daha çevreci yeni nesil bir ısıtma sistemi tasarımı ortaya konulması,
- Sistemin entegre edileceği mahalın TS 825 standartlarında etkin ısı yalıtımının yapılmasıyla, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın ortaya koymuş olduğu binalarda enerji verimliliği hedeflerine uygun bir örnek tasarım uygulaması ortaya konulması,
- Türkiye ve Avrupa Parlamentosu'nun ortak çalışması sonucu ortaya çıkan nSEB süreci için örnek bir tasarım uygulaması ortaya konulması,
- Yapılan etkin ısı yalıtımı ve ısıtma sisteminde yenilenebilir enerji teknolojilerinden faydalanılması sayesinde literatürde yer alan yeşil bina tasarımlarına katkı sağlanması ve enerji mimarisinde yeni bir yaklaşım ortaya konulması,
- Doğalgaz tüketiminin azaltılması ve yenilenebilir enerji teknolojilerinden faydalanılmasıyla hane halkı düzeyinde daha merkezîyetçi ve ekonomiye katma değer yaratan bir tasarım oluşturulması,
- Literatüre; özgün, yenilikçi, sürdürülebilir ve eko tasarım fikrini temele alan aynı zamanda yukarıdaki maddelerde sıralanan hususları da barındıran bir çalışma kazandırılarak, bu konuda var olduğu düşünülen eksikliğin giderilmesi,

amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Mahal ısıtma ve günlük kullanım sıcak suyundan oluşan enerji arzının pik yaptığı özellikle kış mevsiminde ve ısıtma sezonu genelinde, doğalgaz tüketiminin azaltılması, özellikle enerji verimliliği kavramı kapsamında yer alan enerji mimarisi ile yeşil bina konseptine uygun bir tasarım yapılması temel amaçlarıyla ortaya konulan bu tasarım çalışmasında, Ankara ilinde bulunan bir villa referans olarak seçilmiş ve bu villaya TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” kapsamında etkin bir izolasyon çalışması yapılarak mahalın ısınması ve su ısıtması için gerekli toplam enerji ihtiyacı miktarından oluşan ısı yükü hesabı yapılmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonrasındaki değerlendirmeler kapsamında; bölge şartlarına ve mahale uyum sağlayabilecek yeni nesil bir ısıtma sistemi tasarımı ortaya konulmuş olup yapılan tasarım Şekil 1.’de gösterilmiştir (Şensoy, 2019).



Şekil 1. PV/T destekli ısı pompası sistemi

Tasarımda farklı renklerle sunulan hatlara ilişkin olarak;

PV/T destekli ısı pompası hattı, villanın ısıtma ihtiyacını karşılayan PV/T destekli ısı pompası sistemine ait ana çevrimdir. Bu hatta kondenserde atılan ısı enerjisi, mahal ısıtma hattında bulunan radyatör akışkanına transfer olarak pompa-2 yardımıyla radyatörlerde dolaşır. Siyah renkli hatta

bulunan evaporatörler güneşin yeterli olduğu zamanlarda doğrudan PV/T kolektöründen beslenirken güneş yeterli olmadığı durumlarda ise, doğalgaz kaynaklı ek ısıtıcı sisteme destek vermektedir. Dolayısıyla ısı pompası sistemi güneş radyasyonu miktarına göre her iki kaynaktan da farklı sürelerde faydalanabilmektedir.

PV/T soğutucu akışkan ısıtma hattı, ısıtma sezonu içerisinde ısı pompası soğutucu akışkanı sıcaklığının artırılarak evaporatöre yönlendirilmesini sağlayan PV/T sistemine aittir. PV/T sisteminin ısı pompası evaporatörünü beslemesi sayesinde, ısı pompası performans katsayısının artırılması hedeflenmektedir. Ayrıca ısıtma sezonu dışında, hat üzerinde bulunan üç yollu vana sayesinde PV/T paneller, kullanım sıcak suyu için çift serpantinli boylere de yönlendirilebilmektedir.

Kullanım sıcak suyu hattı, kullanım sıcak suyuna aittir. Isıtma sezonunda meskenin kullanım sıcak suyu ihtiyacı oluşursa çift serpantinli boyler içerisinde yer alan termostat kırmızı hattaki üç yollu vanaya sinyal göndermekte ve siyah hatta kondenserde atılan ısı enerjisi kırmızı hat yerine yeşil hatta doğru geçiş sağlamaktadır. Isı enerjisi ihtiyacı bittiğinde ise termostat üç yollu vanaya tekrar sinyal gönderir ve ısı enerjisi tekrar kırmızı hatta transfer edilmeye devam eder. Isıtma sezonu dışında ise, ısı pompası sistemine bağlı kalınmaksızın PV/T kolektörler doğrudan mavi hat üzerinden yeşil hattı desteklemektedir.

PV/T elektrik üretim hattı ile, ısı pompası sistemi kompresörünün ihtiyaç duyacağı elektrik enerjisi ihtiyacını karşılanmaya çalışılmaktadır. Bu hat üzerinden sağlanan elektrik enerjisinin yeterli olmadığı durumlarda, sistem kompresörü şebekeden de ek elektrik enerjisi kullanımı yapmaktadır. Ayrıca sarı hat üzerinde, PV/T kolektörde üretilen DC elektrik enerjisinin, AC ile çalışan ısı pompası kompresörünün kullanabileceği şekle evirmek için invertör de yer almaktadır.

Yapılan tasarımda, parametrelere dayalı hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi için aşağıda sunulan bağıntılar kullanılmıştır.

Isı pompasına optimum açıda entegre edilen PV/T kolektör üzerine düşen toplam radyasyon miktarını (TRA, kJ/m²gün) veren bağıntı Denklem (1)'de sunulmuştur (Ertürk ve Okuyan 2005).

$$TRA = ((DİR \times DİR\text{AF}) + (DİF \times DİF\text{AF}) + (YYRA \times YAO \times YAF)) \times 4,18 \quad (1)$$

Denklem (1)'de ifade edilen difüz radyasyon açısı faktörü (DİF, kJ/m²gün) hesabı Denklem (2)'de ki bağıntı dahilinde hesaplanmıştır (Ertürk ve Okuyan 2005).

$$DİF = (1 - 1,097 \times BUF) \times YYRA \quad (2)$$

Denklem (2)'de ifade edilen bulanıklık faktörü (BUF) hesabı Denklem (3)'te ki bağıntı dahilinde hesaplanmıştır (Ertürk ve Okuyan 2005).

$$BUF = \frac{YYRA}{AÖRA} \quad (3)$$

Denklem (1)'de ifade edilen direkt radyasyon değeri (DİR, kJ/m²gün) hesabı Denklem (4)'te ki bağıntı dahilinde hesaplanmıştır.

$$DİR = YYRA - DİF \quad (4)$$

PV/T panelleri üzerine gelen toplam güneş radyasyonu miktarı (TGRM, kJ/gün) hesabı Denklem (5) kullanılarak elde edilmiştir (Şensoy, 2019).

$$TGRM = TRA \times A_{PV/T} \quad (5)$$

PV/T panelde elde edilip ısı pompası evaporatörüne aktarılabilecek termal enerji miktarı (EKTE, kJ/gün) Denklem (6)'da yer alan bağıntı ile hesap edilmektedir (Şensoy, 2019).

$$EKTE = TGRM \times \alpha \times \eta_{PV/T,termal} \times \eta_{ID} \quad (6)$$

PV/T panelde elde edilip ısı pompası kompresöründe kullanılabilecek olan elektrik enerjisi miktarı (KOE, kJ/gün) Denklem (7)'de yer alan bağıntı ile hesap edilmektedir.

$$KOE = TGRM \times \alpha \times \eta_{PV/T,elektrik} \times \eta_{invertör} \quad (7)$$

Sistem tasarımında evaporatör gücünü (\dot{Q}_e , kW) bulmak için Denklem (8)'de yer alan ifade kullanılmıştır.

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_c - \dot{W}_{giren} \quad (8)$$

Isı pompası kompresörünün izentropik veriminin elde edildiği formül Denklem (9)'da gösterilmiştir (Chen ve Jianlin, 2018).

$$\eta_{izen.} = 0.874 - 0.0135 \times \frac{P_2}{P_1} \quad (9)$$

Sistemde yer alan kompresörün elektrik enerjisi tüketimi (E_{giren} , kWh) Denklem (10)'da yer alan ifade ile hesaplanmıştır.

$$E_{giren} = \dot{W}_{giren} \times t \quad (10)$$

Isı pompası sistemi COP değeri hesabında, Denklem (11)'den yararlanılmıştır.

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_{giren}} \quad (11)$$

Gaz yakıcı cihazın tüketmesi gereken doğalgaz miktarını (V , m³) veren bağıntı Denklem (12)'de sunulmuştur.

$$V = \frac{E_{tüketim}}{H_{ax} \eta_{yanma}} \quad (12)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Villanın mahal ısıtma ve sıcak su tüketimi için ortaya konulan yeni nesil ısıtma sistemi tasarımında kullanılan parametreler ve bu parametrelere bağlı yapılan hesaplamalara ait sonuçlar bu başlık altında toplanmıştır. Bu kısımda öncelikle, eko tasarım esnasında kullanılan parametreler ve ilgili parametre değerlerinin seçilme sebepleri belirtilmiştir. Parametre seçimleri; ısı pompası sistemi, güneş radyasyon değerleri, bina enerji ihtiyacı, PV/T ve diğer sistem bileşenleri üzerinden açıklanmıştır.

Isı pompası sistemine girdi oluşturan yoğuşma ve buharlaşma sıcaklığı değerleri, Ankara ili iklim şartlarına uygun ve yaygın olarak kullanılan sistem sıcaklıkları örnek alınarak kabul yapılmıştır. Tasarımı yapılan ısı pompası teknolojisi için buharlaşma ve yoğuşma sıcaklıklarının uygunluğu açısından R410A soğutkanı tercih edilmiştir. Sistemin buharlaşma ve yoğuşma basınç değerleri, ilgili sıcaklıklarda R410A akışkanı için log P-h diyagram üzerinden belirlenmiştir.

Çalışmada mahal ısıtma enerji ihtiyacı değeri, seçilen villa özelinde TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardına bağlı alınarak etkin bir ısı yalıtımı çalışması sonrasında ısıtma sezonu için, ihtiyaç duyulacak toplam ısıtma yükü olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda Ankara ilinde, ısıtma sezonunun ekim ayı başından mayıs ayı sonuna kadar 7 ay olduğu dikkate alınmıştır. Villanın kullanım sıcak su ihtiyacı öngörüsünde ise mahalde, 6 kişinin yaşadığı kabulü yapılmıştır.

Sistemde, PV/T panellerin optimum kurulum açısı, kış aylarına ve ısıtma sezonu şartlarına göre optimize edilmeye çalışılmış olup, eğim açısı olarak Ankara enlemi olan 39° 55' kuzey enleminden

yaklaşık 15° fazla ve 55° olarak seçilmiştir. Bu bağlamda, kolektör eğim açısına göre değişkenlik gösteren DİFAF ve YAF değeri seçiminde de belirtilen eğim açısı değeri dikkate alınmıştır. Kış aylarında Ankara ili iklimi için yüzey yansıtıcılığı oranı bölge şartlarına uygun olarak taze kar olarak belirlenmiş, bu değer için kabul yapılmıştır. Ankara ili için ortalama etkin güneşlenme saati değerleri kış ayları özelinde Meteoroloji Genel Müdürlüğü verileri kullanarak 4,59 saat/gün olarak belirlenmiştir. (Şensoy, 2019).

Tasarımda kullanılan PV/T panellerin alanı, emicilik katsayısı, termal ve elektrik verim değerleri, invertör verimi, eşanjör ve yanma verimi değerleri ile ilgili tüm bilgiler, ürün tedarikçilerinin veri dokümanlarından araştırılarak alınmış ve çalışmada tasarımın güvenli tarafta kalması amacıyla ortalama değerler seçilmiştir.

Yukarıda parametre seçimlerine dayanak olan hususlar anlatılmış olup, tasarımın sistem analizinde kullanılan tüm parametreler ve bunlara ait değerler Tablo 1.'de sunulmuştur.

Tablo 1. Sistem analizinde kullanılan parametreler

Parametre	Değer	Birim
Kondenser kapasitesi, \dot{Q}_c	18	<i>kW</i>
Evaporasyon sıcaklığı, T_L	10	$^\circ C$
Kondenzasyon sıcaklığı, T_H	50	$^\circ C$
Buharlaşma basıncı, P_1	10,817	<i>bar</i>
Yoğuşma basıncı, P_2	30,330	<i>bar</i>
Difüz radyasyon açı faktörü değeri, DİFAF	0,785	-
Yansıtılmış açı faktörü değeri, YAF	0,215	-
Yansıtıcılık oranı, YAO	0,750	-
Ankara ortalama etkin güneşlenme saati	4,59	<i>saat</i>
Ankara için PV/T panelin optimum açısı	55	$^\circ$
Villa mahalinin ısıtılması için aylık ortalama enerji ihtiyacı	1.018,43	<i>kWh</i>
Villada kullanılan ısıtma suyu için aylık ortalama enerji ihtiyacı	287,13	<i>kWh</i>
Villanın ısıtılması ve kullanım sıcak suyu için gerekli toplam aylık ortalama enerji miktarı	1.345,88	<i>kWh</i>
Doğalgaz alt ısıtılma değeri, H_a	9,59	<i>kWh/Nm³</i>
Yanma verimi, η_{yanma}	95	%
Eşanjör verimi, $\eta_{eşanjör}$	90	%
PV/T kolektörler emicilik katsayısı, α	92	%
Bir adet PV/T panel alanı, $A_{PV/T}$	1,94	<i>m²</i>
PV/T termal verimi, $\eta_{PV/T,termal}$	64,4	%
PV/T elektrik verimi, $\eta_{PV/T,elektrik}$	15,5	%
İnvertör verimi, $\eta_{invertör}$	95	%
Mesken için doğal gaz birim fiyatı	6,049 [†]	<i>₺/Nm³</i>

Isıtma sezonunda güneş radyasyonun yeterli olduğu zamanlarda, doğalgaz kaynaklı ek ısıtıcıdan asgari oranda yararlanılması amaçlanan bu çalışmada, Tablo 1.'de belirtilen parametreler,

[†] Ankara ili doğalgaz tedarikçisinin güncel birim fiyatlarıdır (Başkent Doğalgaz, 2023).

ilgili denklem ve metodolojiler kullanılarak yapılan analizler sonucunda Tablo 2.'de belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

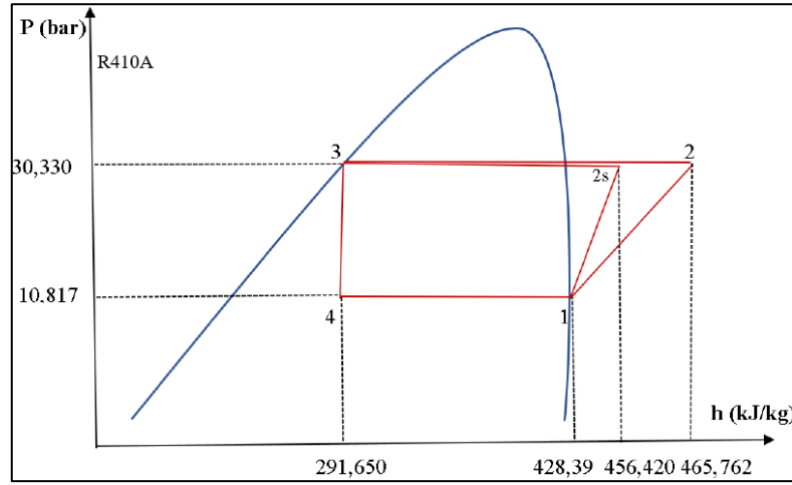
Tablo 2. Analiz sonuçları

Analiz	Değer	Birim
Isı pompası performans katsayısı, COP _{IP}	4,65	-
Kompresör gücü, W_{giren}	3,87	kW
Evaporatör kapasitesi, Q_e	14,13	kW
Kompresör izantropik verimi, $\eta_{izen.}$	83,61	%
Gerekli toplam PV/T panel alanı, $A_{PV/T}$	35,5	m ²
Gerekli PV/T panel sayısı	19	adet
Kompresörün aylık enerji tüketimi, E_{giren}	532,89	kWh
Ek ısıtıcının devrede olma süresi	7	h/gün
Ek ısıtıcı devrede iken aylık toplam enerji tüketimi	812,98	kWh
Tasarım öncesi aylık ortalama doğalgaz ihtiyacı	150,00	m ³
Isı pompası entegresi sonrası aylık ortalama doğalgaz ihtiyacı	89,09	m ³
Tasarım ile yıllık doğalgaz tasarrufu	40,60	%
Tasarım ile yıllık doğalgaz tasarrufu	426,37	m ³
Yıllık doğalgaz tasarruf bedeli, $\text{₺}_{tasarruf}$	2.579,41	₺
Yıllık engellenen karbon salınımı miktarı	0,861	ton CO ₂ /yıl

Isıtma sezonunda, PV/T destekli ısı pompası sisteminin devrede olduğu zamanlarda gerçekleştirilen hesaplamalarda, mahalın aylık doğalgaz ihtiyacının 89,09 m³ olduğu, yenilikçi tasarım öncesi şartlarda ise mahalın aylık doğalgaz ihtiyacının ortalama 150 m³ olduğu hesaplanmıştır. Eko tasarım yaklaşımıyla ortaya konulan bu çalışma neticesinde mahalde kullanılan doğalgazdan aylık ortalama %40,60 tasarruf sağlanmaktadır. Aylık bazda, yaklaşık 60,91 m³ azalan bu tüketim ile de mali yönden gerçekleşen tasarrufun yansira tek bir mahal özelinde 0,861 ton CO₂/yıl karbon salımı engellenmesi sağlanarak çevresel hassasiyetlere ilişkin de olumlu çıktılar elde edilmiştir.

Sisteme entegre edilen PV/T destekli ısı pompası ekipman ve kurulum maliyeti, ısıtma sezonunda sağlanan yıllık doğalgaz tasarruf bedeli ve ısıtma sezonu dışında PV/T panel ile şebekeye elektrik satılmasıyla elde edilecek gelir gibi hususlar dikkate alındığında, sistemin geri ödeme süresi yaklaşık 8,50 yıl olarak hesaplanmıştır.

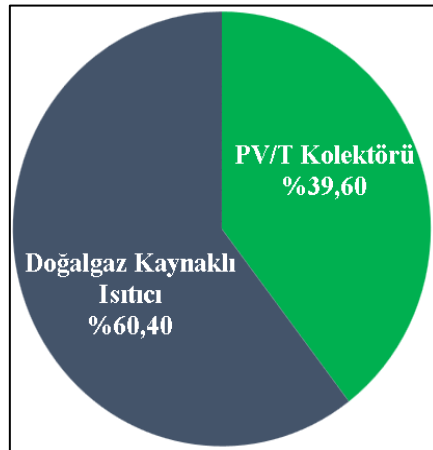
Tablo 1.'de verilen parametreler ve Tablo 2.'de sunulan analiz sonuçları dahilinde PV/T panel desteği ile tasarlanan ve R410A soğutucu akışkanıyla çalışan ısı pompası sistemine ait taslak log P-h diyagramı Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Isı pompası sistemi taslak log P-h diyagramı

Şekil 2.'de yer alan diyagramda görüleceği üzere, 1-2 noktaları arasında kompresörün sıkıştırma oranı 2,80'dir. Bu sıkıştırma yapılırken kompresörde, öncelikli olarak PV/T panellerde üretilen elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Güneşin yeterli olduğu zamanlarda PV/T panellerden elde edilebilir toplam elektrik enerjisi 3,94 kWh olup bu değer, kompresörün tüketim ihtiyacı olan 3,87 kWh elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilmektedir. Tasarım sonucunda elde edilen veriler dahilinde sistemin COP değeri 4,65 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca PV/T panellerle üretilen elektrik enerjisi miktarının yaklaşık 4,15 katı kadar termal enerji elde edilerek güneş enerjisinden maksimum fayda sağlamaya yönelik bir tasarım ortaya konulmuştur. Bu anlamda özellikle konutlar başta olmak üzere, fosil temelli yakıtların tüketiminin azaltılması ve buna bağlı olarak da karbon salınımı miktarının azaltılması amaçları dahilinde sonuçlar elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışma ile doğalgaz kaynaklı ısıtıcının çalışma periyodu önemli oranda azalmış ve bunun sonucunda doğalgaz kullanımında da ciddi oranda düşüş yaşanmıştır. Isıtma sezonunda, villanın enerji tüketimine sistemlerin yüzdelik katkısı Şekil 3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Villanın toplam enerji tüketiminde sistemlerin yüzdelik katkı grafiği

Literatüde PV/T destekli ısı pompası sistemiyle ısıtma yapılan bir çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Altınkaynak ve arkadaşları (2021), güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi ile yapmış oldukları çalışmada, ısı pompası kompresörünü çalıştırmak için dokuz adet, toplamda 1422 W elektriksel ve 4397 W ısı gücü aldıkları, PV/T panelleri kullanmışlardır. Çalışmada, güneş ışınım şiddeti arttıkça panelden elde edilen toplam elektriksel ve ısı gücün arttığı, ortam sıcaklığı artışının, elektriksel verimi düşürdüğü ısı verimi ise arttırdığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Son olarak çalışmada yer alan ısı pompası sisteminin COP değeri 4,41 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca bu çalışmada ortaya konulan tasarımın yaratmış olduğu ekonomik, çevresel ve diğer sonuçlar bir sonraki bölümde açıklanarak çeşitli öneriler sunulmuştur.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Tasarımı gerçekleştirilen PV/T destekli ısı pompası sistemi doğalgaz kaynaklı ek ısıtıcıya alternatif yeni nesil bir ısıtma sistemi olarak ortaya konulmuş olup bu tasarımla birlikte mesken mahalini ısıtılması ve sıcak su ihtiyacı karşılanmıştır.

R410A soğutucu akışkanı ile çalışan güneş enerjisi destekli ısı pompası sisteminin COP değeri 4,65 olarak hesaplanmıştır. Villanın enerji ihtiyacını karşılamak için ortalama doğalgaz ihtiyacı ısıtma sezonunda aylık ortalama 60,91 m³ azalmıştır. Bu tasarrufun ekonomik karşılığının 2.579,41₺ olduğu saptanmıştır. Çevresel olarak ise, doğalgaz tüketiminde yaşanan %40'lık azalmanın karbon salınımına etkisi araştırılmış ve yıllık doğalgaz tüketimindeki azalma ile ısıtma amaçlı doğalgaz yakıtı baz alınarak yılda 0,861 ton karbon salınımının önüne geçildiği hesap edilmiştir. Ekonomik ve çevresel olarak ortaya konan veriler bir adet mesken özelinde olup Türkiye'deki konut sayısının yaklaşık 39 milyon olduğu göz önüne alındığında hem mali tasarruf hem de çevresel olarak karbon salınımının azaltılması yönünden tasarımın büyük bir potansiyel barındırdığı görülmektedir. Bu potansiyel değerlendirilebildiği takdirde, ülke cari açığının en büyük kalemi olan doğalgaz kullanımındaki azalmayı da tetikleyeceğinden T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın ortaya koymuş olduğu "Milli Enerji" vizyonu ile de örtüşmektedir.

Bu çalışma, nSEB kapsamında ortaya koyulması gereken; TS 825 ile binaların enerji performansının iyileştirilmesi ve binalarda yenilenebilir enerji payının bulunması gibi kriterleri de barındırdığından inşaat sektörü için örnek bir uygulama mahiyeti de taşımaktadır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar, makalenin tüm süreçlerinde “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, karşılaşılabilecek etik ihlallerden Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi ve yayın kurulunun herhangi bir sorumluluğunun bulunmadığını, bu çalışmanın Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi dışında herhangi bir akademik yayın ortamında değerlendirilmediğini beyan ederler.

Simgeler ve Kısaltmalar

Simgeler

$A_{PV/T}$	PV/T kolektör yüzeyi toplam alanı, [m ²]
E_{giren}	Kompresörün elektrik enerjisi tüketimi, [kWh]
$E_{tüketim}$	Villada ısıtma amacıyla tüketilen toplam enerji, [kWh]
H_a	Doğalgaz alt ısı değerleri, [kWh/Nm ³]
h	Entalpi, [kJ/kg]
P	Basınç, [bar]
P_2	Kompresör çıkış basıncı, [bar]
P_1	Kompresör giriş basıncı, [bar]
\dot{Q}_c	Kondenser kapasitesi, [kW]
\dot{Q}_e	Evaporatör kapasitesi, [kW]
t	Zaman, [s]
T_H	Yoğuşma sıcaklığı, [K]
T_L	Buharlaşma sıcaklığı, [K]
V	Sarf edilmesi gereken saatlik doğalgaz miktarı, [Nm ³ /h]
\dot{W}_{giren}	Kompresör gücü, [kW]
$\eta_{eşanjör}$	Sistem eşanjörlerinin verimi, [%]
η_{yanma}	Gaz yakıcı cihaz yanma verimi, [%]
$\eta_{invertör}$	İnvertör verimi, [%]
$\eta_{izent.}$	Kompresör izantropik verimi, [%]
$\eta_{PV/T, elektrik}$	PV/T elektriksel verimi, [%]
$\eta_{PV/T, termal}$	PV/T termal verimi, [%]
$\dot{E}_{tasarruf}$	Yıllık doğalgaz tasarruf bedeli, [₺]
α	PV/T kolektörün güneş ışınımı yutma katsayısı, [%]

Kısaltmalar

AÖRA	Atmosfer öncesi güneş radyasyonu değeri, [kJ/m ² gün]
BUF	Bulanıklık faktörü
CO₂	Karbondioksit
COP	Performans katsayısı
COP_{IP}	Isı pompası performans katsayısı
DİFAF	Difüz radyasyon açısı faktörü

DİR	Direkt radyasyon miktarı, [kJ/m ² gün]
DİRAF	Direkt radyasyon açısı faktörü
DİF	Difüz radyasyon miktarı, [kJ/m ² gün]
EKTE	Isı pompası evaporatörüne aktarılan termal enerji, [kJ/m ² gün]
IP	Isı pompası
KOE	PV/T panelde üretilip kompresörde kullanılacak elektrik enerjisi miktarı, [kWh]
nSEB	Neredeyse sıfır enerjili bina
PV/T	Fotovoltaik termal
TGRM	Kolektörlere düşen toplam güneş enerjisi radyasyon miktarı, [kJ/gün]
TRA	Birim kolektör yüzeyine düşen ışıyım miktarı, [kJ/m ² gün]
TS	Türk Standartları
YAF	Yansıtılmış açısı faktörü
YAO	Yansıtma oranı
YYRA	Yeryüzü radyasyonu, [kJ/m ² gün]

Kaynaklar

- Altınkaynak, M., Demirekin, R. and Yakut, A.K. (2021). Energy and exergy analysis of a PV-T collector welded heat pump system. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 753-762.
- Chen, J. and Jianlin Y. (2018). Energy and exergy analysis of a new directexpansion solar assisted vapor injection heat pump cycle with subcooler for water heater. *Solar Energy*, 171,613-620.
- Chow, T.T., Tiwari, G.N. and Ménézo, C. (2012). Hybrid solar technology for power polygeneration and energy saving. *International Journal of Photoenergy*, 2012.
- Dehwah, A. H. A., and Asif, M. (2017). Assessment of net energy contribution to buildings by rooftop photovoltaic systems in hot-humid climates. *Renewable Energy*, 131, 1288-1299.
- Elhuveydi, A. and Oral, F. (2022). Evaluation of structural problems that cause heat loss in buildings with thermal camera imaging technique. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 25(3), 370-380.
- Ertürk, M. ve Okuyan, C. (2005). Geliştirilen bilgisayar programıyla ülkemizdeki illere göre güneş kolektörü yüzeyinin hesaplanması ve seçilmesi. *4th International Advanced Technologies Symposium* (s. 157-161). Konya, Türkiye.
- Gül, M. ve Akyüz, E. (2019). Fotovoltaik-termal (PV/T) bir sistemin deneysel performansının incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 444-458.
- Irulegi, O., Pardo, A.R., Serra, A., Salmerón, J.M., and Vega, R. (2017). Retrofit strategies towards net zero energy educational buildings: A case study at the University of the Basque Country. *Energy and Buildings*, 144, 387-400.
- Jain, M. and Pathak, K. (2018). Thermal modelling of insulator for energy saving in existing residential building. *Journal of Building Engineering*, 19, 62–68.
- Jaysawal, K.R., Chakraborty, S., Elangovan, D., and Padmanaban S. (2022). Concept of net zero energy buildings (NZEB)- a literature review. *Cleaner Engineering and Technology*, 11(3), 100582.
- Lazzarin, R. (2020). Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future. *International Journal of Refrigeration*, 116(2), 146-160.
- Li, H. and Sun, Y. (2018). Operational performance study on a photovoltaic loop heat pipe/solar assisted heat pump water heating system. *Energy and Buildings*, 158, 861-872.
- Mermer, M. (2019). *Bina ısı yalıtım sistemlerinin incelenmesi ve optimizasyonu*. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Öztürk, M. (2021). *PV/T destekli ısı pompalı sıcak su üretim sisteminin enerji, ekserji ve ekonomik analizi*. Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- Rüßen, S.E., Topçu, M.A., Celep, G.K., Çeltek, S.A. ve Rüßen, A. (2018). Üniversite kampüs binaları için enerji etüdü: Örnek çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 83-92.
- Şensoy, B. (2019). *Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemlerinin performans analizi*. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- URL-1: <https://www.baskentdogalgaz.com.tr/tr/page/Satis-Tarifeleri-ve-Fiyatlari/31> , (Erişim Tarihi: 25 Ağustos 2023).
- Wang, G., Zhao, Y., Quan, Z. and Tong, J. (2018). Application of a multi-function solar-heat pump system in residential buildings. *Applied Thermal Engineering*, 130: 922-937.
- Wang, Z., Haung, D., Wang, P., Shen, Q., Zhang, Q. and Sun, Y. (2015). An analysis of solar heating system assisted by ground-source heat pumps in office building. *Procedia Engineering*, 121, 1406-1412.
- Zhang, P., Rong, X., Yang, X. and Zhang, D., (2019). Design and performance simulation of a novel hybrid PV/T-air dual source heat pump system based on a three-fluid heat exchanger. *Solar Energy*, 191(8), 505-517.
- Zho, J., Ma, X., Zhao, X., Yuan, Y., Yu, M., and Li, J. (2020). Numerical simulation and experimental validation of a micro-channel PV/T modules based direct-expansion solar heat pump system. *Renewable Energy*, 145(5), 1992-2004.