

Toprak Kaynaklı Isı Pompasıyla Çalışan Yerden Isıtma/Serinletme Sisteminin VRF Sistemi İle Enerji Kıyaslaması

Berker TANRIOVER

Mak. Müh.
Tanrioover Mühendislik
İstanbul
berker@tanrioover.com
orcid: 0000-0003-1844-370X

Deniz YILMAZ

Doç. Dr.
İstanbul Arel Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği
İstanbul
denizyilmaz@arel.edu.tr
orcid: 0000-0003-1109-6397

ÖZ

Artan dünya nüfusu ve teknolojik gelişmelerle birlikte, insanların kapalı ortamlarda vakit geçirme sürelerinin artması, iklimlendirme sistemlerine olan ihtiyaçları da beraberinde getirmiştir. Bununla birlikte kaynakların tükenme hızının artması sonucu enerjiyi verimli kullanma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme arayışı başlamıştır. Bu arayış içinde enerji en çok tüketildiği sektörlerden biri olan iklimlendirme sektörü için de yeni çözümler geliştirilmektedir. Bu çalışmada örnek bir binada uygulama yapılmış ve toprak kaynaklı ısı pompasına bağlı olan yerden ısıtma/serinletme sistemi, VRF (Variable Refrigerant Flow) sistemi ile karşılaştırılmıştır. İstanbul'da bulunan binanın ısı kazancı ve ısı kaybı hesapları yapılarak projelendirilmiş, sistemlerin harcadıkları enerji miktarları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre toprak kaynaklı ısı pompası ile çalışan yerden ısıtma/serinletme sisteminin daha az enerji sarf ettiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

Toprak Kaynaklı Isı Pompası, VRF, Yerden Serinletme, Yerden Isıtma.

Energy Comparison of Floor Heating/Cooling System Working With Ground Source Heat Pump and VRF System

ABSTRACT

With the increasing world population and technological developments, the increase in the amount of time people spend in closed environments has brought the need for air conditioning systems. However, as a result of the increase in the depletion rate of resources, the search for efficient use of energy and orientation to renewable energy sources has begun. In this pursuit, new solutions are being developed for the air conditioning sector, which is one of the sectors where energy is consumed the most. In this study, an application was made in a sample building and the floor heating/cooling system connected to the ground source heat pump was compared with the VRF (Variable Refrigerant Flow) system. The heat gain and heat loss calculations of the building in Istanbul were made and the project was designed, and the amount of energy consumed by the systems was compared. According to the results obtained, it has been observed that the underfloor heating/cooling system operating with a ground source heat pump consumes less energy.

Keywords

Ground Source Heat Pump, VRF, Floor Cooling System, Floor Heating System.

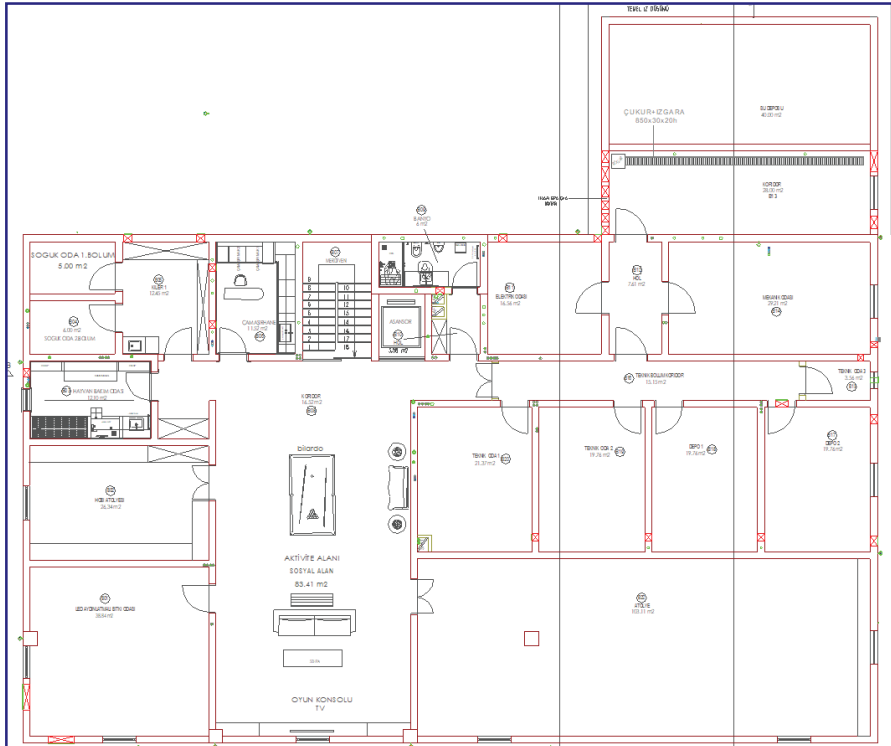
Geliş Tarihi : 31.07.2021
Kabul Tarihi : 27.10.2021

1. GİRİŞ

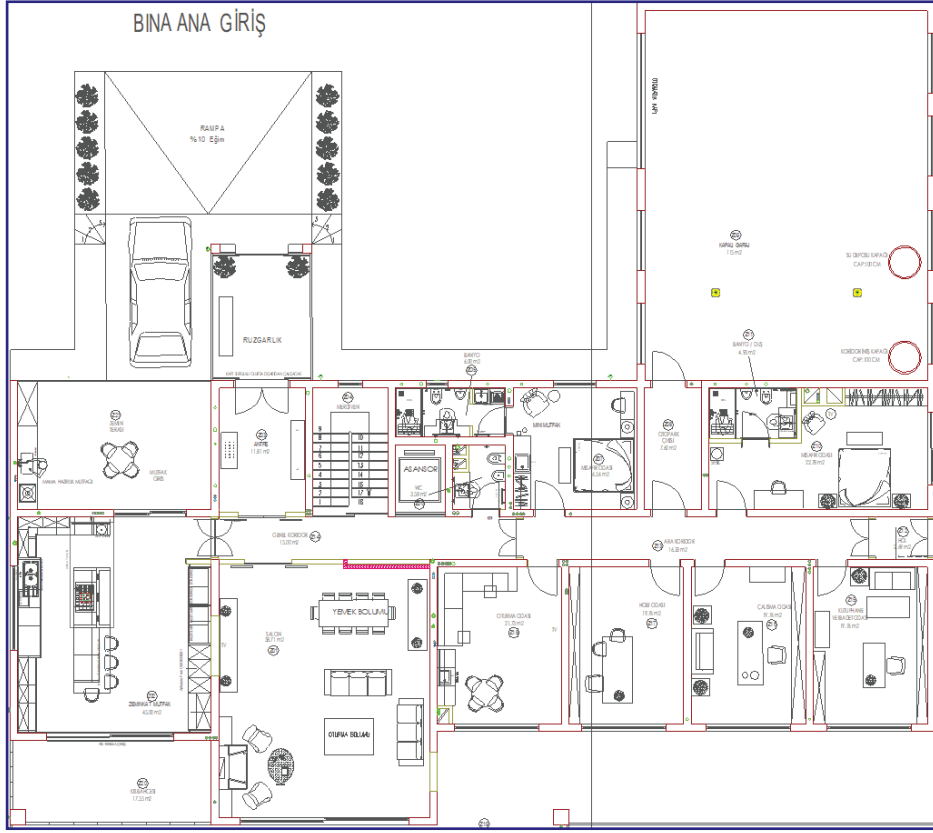
Geçmişten günümüze enerjinin insanoğlu için önemi bilinen bir gerçektir. İnsanlar, hayatlarını sürdürebilmek ve daha refah bir hayata sahip olabilmek için enerjiye ihtiyaç duymaktadırlar. Günümüzde en çok kullanılan enerji kaynağı olan fosil yakıtlar tükenebilir bir enerji kaynağı ve sebep olduğu sera gazı salınımından dolayı, enerjiyi verimli kullanmak için araştırmalar yapılmakta ve alternatif enerji kaynaklarına yönelim gün geçtikçe artmaktadır. Yapılan araştırmalarda toprak kaynaklı ısı pompasının enerji verimliliğinin yüksek olduğu görülmüştür (Bojić et al., 2015; Lubis et al., 2011). Bunun sebeplerinden biri olarak toprağın sabit sıcaklıkta ve jeolojik malzemelerin yüksek ısı kapasitelerine sahip olması gösterilebilir (Omer, 2008). Toprak kaynaklı ısı pompası ile çalışan yerden ısıtma/serinletme sistemi de araştırmacıların ilgisini kazanmıştır. Bunun sebepleri arasında yerden ısıtma/serinletme sisteminin enerji konusunda tasarruf sağlama potansiyeline sahip olması gösterilebilir (Stetiu, 1999). Sistem, enerji verimliliği konusunda başarılı olsa da yüzeylerde oluşacak yoğuşma konusu en önemli dezavantajlarından (Tang et al., 2016; Zhang and Niu, 2003). Soğutma yapılan zeminde oluşan yoğuşmanın önlenmesi

için nem alma cihazları kullanılması da alternatif çözümlerden biri olarak literatürde uygulanmıştır (Zarella et al., 2014). Nem problemi olsa bile yerden ısıtma/serinletme sisteminin diğer sistemlere göre konfor açısından da iyi olduğu görülmüştür (Gao et al., 2017; Zhou et al., 2019). Çünkü, yerden serinletme sisteminde hava hızları diğer sistemlere göre daha düşük olması kalmaktadır (Kalmár, 2018; Kitagawa et al., 1999; Koşir et al., 2010).

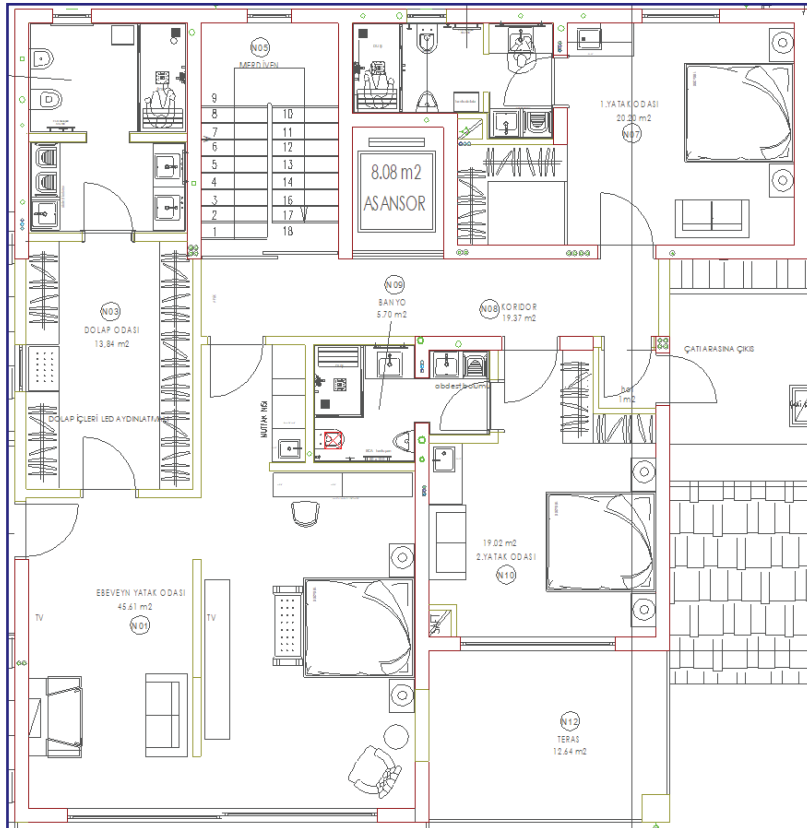
Bu çalışmada örnek bir binada uygulama yapılmış ve toprak kaynaklı ısı pompasına bağlı olan yerden ısıtma/serinletme sistemi, VRF sistemi ile karşılaştırılmıştır. İstanbul'da bulunan binanın ısı kazancı/ısı kaybı hesabı yapılmış, elde edilen verilerle mahal boru aralıkları belirlenmiş ve sistem için gereken toplam su debisi bulunmuştur. İstanbul şartlarına göre toprak kaynaklı ısı pompası için su sıcaklıkları hesaplandıktan sonra HAP (Hourly Analysis Program) programı ile ısı pompasının enerji tüketimi bulunmuştur. Diğer taraftan, binanın VRF sistemine göre iç üniteleri ve dış ünitesi seçilmiştir. Dış ünitenin farklı iklim şartlarına göre EER (Energy Efficiency Ratio) değerleri hesaplanmış ve sistemlerin enerji tüketimleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Binanın bodrum kat mimari çizimi



Şekil 2. Binanın zemin kat mimari çizimi



Şekil 3. Binanın 1. kat mimari çizimi

2. PROJELENDİRME ve HESAPLAMALAR

2.1 Projelendirme Esasları

Çalışılan bina İstanbul'da bulunmaktadır. Bina, 1. kat, zemin kat ve bodrum kat olmak üzere 3 katlıdır. Kat yüksekliği üç metredir. Bina zemin katı 496 m², bodrum kat 636 m² ve 1. katı 214 m²'dir. Binanın mimari projeleri Şekil 1, 2 ve 3'te gösterilmiştir.

İstanbul'un kış ve yaz mevsimi için dış hava şartları sırasıyla -3 °C ve 33 °C kuru termometre sıcaklığı, 24 °C yaş termometre sıcaklığı olarak alınmıştır (Türk Standartları Enstitüsü, 2013). Sistemin hesaplamaları yapılırken mahal sıcaklıkları, kış şartlarında 20 °C, yaz şartlarında ise VRF sistemi kullanıldığında 24 °C, toprak kaynaklı ısı pompası sistemi kullanıldığında 28 °C olacak şekilde tasarlanmıştır. Kişilerin mahallerde bulunma süreleri 14-17 saat arasında kabul edilmiştir. İnsanlardan kazanılacak duyulur ısı 71,8 W ve gizli ısı 60,1 W olacak şekilde hesaplamalarda kullanılmış ve insanlardan gelecek toplam ısı kazancı 131,9 W alınmıştır (ASHRAE, 2017). Projesi yapılan binada kullanılan yalıtım malzemelerinin özellikleri ve bu izolasyon malzemelerinin ısı iletim katsayıları Tablo 1'de, yapı elemanları ve ısı iletim katsayıları Tablo 2'de tanımlanmıştır.

Çalışma kapsamında hesaplamalar Carrier Saatlik Analiz Programında (Hourly Analysis Program – HAP v5.0®) yapılmıştır. HAP® programı hesaplamaları yaparken Transfer Fonksiyonu Yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntem ASHRAE tarafından kabul görmüş bir hesaplama yöntemidir. Bu yöntem kapsamında, binada ısı kazancına sebep olan dış ve iç etmenlerin soğutma yüküne dönüşümü matematiksel ifadelerle incelenmektedir. Hesaplamalar yapılırken bina kullanım durumu da dikkate alındığından, binaya özgü hesaplama yapılabilir. Hesaplamalar sonucunda binanın toplam ısı kazancı 32643 W, toplam ısı kaybı ise 35125 W olarak bulunmuştur.

Tablo 2. Bina Yapı Elemanları Özellikleri

Yapı Elemanın İsmi	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
25 cm Tuğla Dış Duvar	0,329
25 cm Betonarme Dış Duvar	0,359
50 cm Betonarme Dış Duvar	0,347
25 cm Betonarme Toprak Temaslı Duvar	0,280
15 cm Tuğla İç Duvar	2,006
20 cm Tuğla İç Duvar	1,726
25 cm Tuğla İç Duvar	1,532
30 cm Tuğla İç Duvar	1,435
25 cm Betonarme İç Duvar	2,500
Katlar Arası Döşeme	2,194
Toprak Temaslı Döşeme	0,259
Tavan (Çatı Arası)	0,360
Teras Tavan	0,512
Katlar Arası Tavan	2,662

2.2. Sistem Hesaplamaları

2.2.1. Toprak kaynaklı yerden ısıtma/serinletme sistemi

Mahallerden çekilebilecek ısı miktarları için hesaplamalarda kullanılan formüller aşağıdaki gibidir. Hesaplamalarda döşeme sıcaklığının ve boru yüzey sıcaklığının sabit olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca ısı transferinin iki boyutlu gerçekleştiği ve döşeme içi ısı iletim direncinin değişmediği kabulü ile şekil faktörü kullanılmıştır. Buna göre döşemenin üst yüzeyinden aktarılacak ısı miktarının hesabı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Doğan, V. & Çalışır O. (2012));

$$q_u = (Z_u \cdot S_u / R_u \cdot w \cdot L) \cdot (T_{sm} - T_{yu}) \quad (1)$$

$$S_u = 2\pi L / [\ln((2w/\pi D)\sinh(2\pi Z_u/w))] \quad (2)$$

$$q_a = (Z_a \cdot S_a / R_a \cdot w \cdot L) \cdot (T_{sm} - T_{ya}) \quad (3)$$

$$S_a = 2\pi L / [\ln((2w/\pi D)\sinh(2\pi Z_a/w))] \quad (4)$$

Ortalama su sıcaklığının hesaplama yöntemi döşeme borularının salyangoz veya firkete tipi döşemesine göre değişiklik göstermektedir. Bu projede

Tablo 1. Bina Duvarlarında Kullanılan İzolasyon Malzemesi Özellikleri

Yapı Elemanı	İzolasyon Malzemesi	İzolasyon Kalınlığı	Isı İletim Katsayısı (W/m ² K)
Toprak Temaslı Dış Duvar	XPS	10 cm	0,030
Çatı Arasına Bakan Tavan	Taş yünü	10 cm	0,040
Teras Tavan	XPS	5 cm	0,030
Toprak Temaslı Döşeme	XPS	10 cm	0,030
Diğer Dış Duvarlar	Taş yünü	10 cm	0,040

borular salyangoz tipine göre döşeneceği için mahalden geçen suyun ortalama sıcaklığı (5) eşitliğinde gösterilmektedir. Bu eşitlikte T_{sg} suyun mahal giriş sıcaklığını, T_{sc} suyun mahal çıkış sıcaklığını göstermektedir.

$$T_{sm} = (T_{sg} - T_{sc}) / 2 \quad (5)$$

Üst ve alt döşeme ısı dirençleri hesaplanırken sırasıyla (6) ve (7) eşitlikleri kullanılır. Bu eşitliklerde h_i taşınım katsayısını, l_i (m) döşemeyi oluşturan tabaka kalınlığını, k_i (W/m°C) tabaka kalınlıklarının ısı iletim katsayılarını ifade etmektedir;

$$R_{u_i} = 1/h_i + \sum(l_i/k_i) \quad (6)$$

$$R_{a_i} = 1/h_i + \sum(l_i/k_i) \quad (6)$$

Taşınım katsayısının bulunabilmesi için (8), (9) ve (10) eşitlikleriyle sırasıyla Reynolds, Prandtl ve Nusselt sayıları hesaplanmıştır;

$$Re = \rho \cdot V \cdot D / \mu \quad (8)$$

$$Pr = \mu \cdot C_p / k \quad (9)$$

Eğer $0,7 \leq Pr \leq 160$ ve $Re > 10000$ ise;

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (10)$$

Nusselt sayısı kullanılarak (11) eşitliği ile boru içindeki ısı taşınım katsayısı bulunmuştur;

$$h_i = Nu \cdot k / D \quad (11)$$

Sistemde dolaşan suyun debisi Eşitlik (12) ile hesaplanmıştır. Eşitlikte bulunan 1,1 değeri döşeme içinden geçen borunun sadece üst mahalden değil alt mahalden de ısı alıyor olmasından dolayı gereken fazladan debi ihtiyacından gelmektedir.

$$\dot{m} = (\dot{Q} / c \cdot \Delta T) \cdot 1,1 \quad (12)$$

Eşitlik (12) kullanılarak mahaller için hesaplanan su debileri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Sistem soğutma halindeki ΔT 'nin ısıtma halindeki ΔT 'den düşük olması ve (12) eşitliğine göre ihtiyaç duyulacak su debisinin yüksek olmasından dolayı hesaplanan su debileri soğutma durumuna göre belirlenmiştir.

Tablo 3'ü inceleyecek olursak, sistemin istenilen şartlarda çalışabilmesi için gerekli toplam su debisi 4579 l/h bulunmaktadır. Isı pompasının harcayacağı elektrik gücünün bulunabilmesi için öncelikle toprakla ısı transferinde bulunan suyun giriş ve çıkış sıcaklıklarının bulunması gerekmektedir. Bu sıcaklıkların bulunabilmesi için dış hava sıcaklığı ile bağlantılı olan formüller kullanılmıştır.

Tablo 3: Mahallerin Yerden Isıtma/Serinetme Sistemi İçin İhtiyacı Olan Su Debileri

Mahal Adı	Su Debisi (l/h)
Ebeveyn Yatak Odası	232
Dolap Odası	81
Yatak Odası 1	121
Koridor	69
Yatak Odası 2	107
Salon	343
Mutfak	211
Antre	83
Misafir Odası	99
Misafir Odası	136
Hol	17
Genel Koridor	82
Kütüphane	138
Çalışma Odası	138
Hobi Odası	138
Oturma Odası	140
Kış Bahçesi	123
Bitki Odası	272
Hobi Atölyesi	184
Kiler	74
Çamaşırhane	81
Koridor	115
Depo 2	118
Depo 1	118
Teknik Oda 2	118
Teknik Oda 1	126
Sosyal Alan	497
Atölye	618

Tablo 4. İstanbul sıcaklıklarına göre T_H ve T_C değerleri

Dış Hava Sıcaklıkları (°C)	T_H	T_C
-3	17,00	-
0	17,95	-
3	18,90	-
6	19,84	-
9	20,79	-
12	21,74	-
18	-	23,56
21	-	24,45
25	-	25,63
29	-	26,82
33	-	28,00
36	-	28,89

$$T_H = T_{min} + (T_{mean} - T_{min}) / (T_{a,mean} - T_{a,min}) \cdot (T_a - T_{a,min}) \quad (13)$$

$$T_C = T_{mean} + (T_{max} - T_{mean}) / (T_{a,max} - T_{a,mean}) \cdot (T_a - T_{a,mean}) \quad (14)$$

$$T_{min} = T_{a,min} + 25 \quad (15)$$

$$T_{max} = T_{a,max} - 5 \quad (16)$$

Eşitlik 15 ve 16'da bulunan T_{min} ve T_{max} değerleri hesaplanırken bölgenin yıl boyunca sahip olacağı en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri kullanılır. Hesaplamalar için gereken sıcaklık değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Değerler Tablo 4'te verilmiştir.

2.2.2. VRF sistemi

VRF sisteminin iç ve dış üniteleri ısı kazancı ve ısı kaybı hesaplarında elde edilen kapasite değerlerine uygun olarak seçilmiştir. VRF sistemi 16 HP kapasitesinde olup, iki borulu sistem kullanılmıştır. Sisteme 18 adet iç ünite bağlanmıştır. VRF sistemi hava kaynaklı olduğu için sistemin EER değerleri dış hava şartlarına bağlıdır. VRF sisteminin EER değerleri ve seçilecek olan iç ünitelerin kapasiteleri üretici firma kataloglarından alınmıştır. VRF sisteminin değişen hava sıcaklıklarına göre EER değeri aşağıdaki formül ile bulunmuştur;

$$EER = Q/W \quad (17)$$

Burada Q (kW) değeri sistemin soğutma kapasitesini, W (kW) değeri ise çekilen elektrik gücünü göstermektedir. VRF sisteminin EER değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Hesaplamalarda, Tablo 5'e göre binanın dış hava sıcaklığının en yüksek olduğu zaman dilimindeki hava sıcaklığı ve buna bağlı olan EER değeri dikkate alınmıştır.

Tablo 5 incelendiğinde, dış ünitenin İstanbul'un en sıcak gününde (33 °C) harcayacağı elektrik gücünün 11,49 kW olduğu görülmektedir. VRF sisteminin %100 kapasitede harcayacağı toplam elektrik gücünü bulabilmek için iç ünitelerin de harcadığı elektrik tüketimi bulunmalıdır. İç ünitelerin harcadığı elektrik güçleri üretici firma kataloglarından bulunmuştur (Tablo 6).

Tablo 5. VRF Sistemi Dış Ünitesinin Dış Hava Sıcaklığına Göre Soğutma Kapasitesi Ve Eer Değerleri

Dış Hava Sıcaklığı (°C)	Soğutma Kapasitesi (kW)	EER Değerleri
10	6,93	6,37
12	7,02	6,29
14	7,19	6,14
16	7,3	6,05
18	7,48	5,9
20	7,81	5,65
21	8,06	5,48
23	8,64	5,11
25	9,18	4,8
27	9,75	4,5
29	10,29	4,24
31	10,88	3,99
33	11,49	3,76
35	12,07	3,55
37	12,65	3,36
39	13,23	3,18

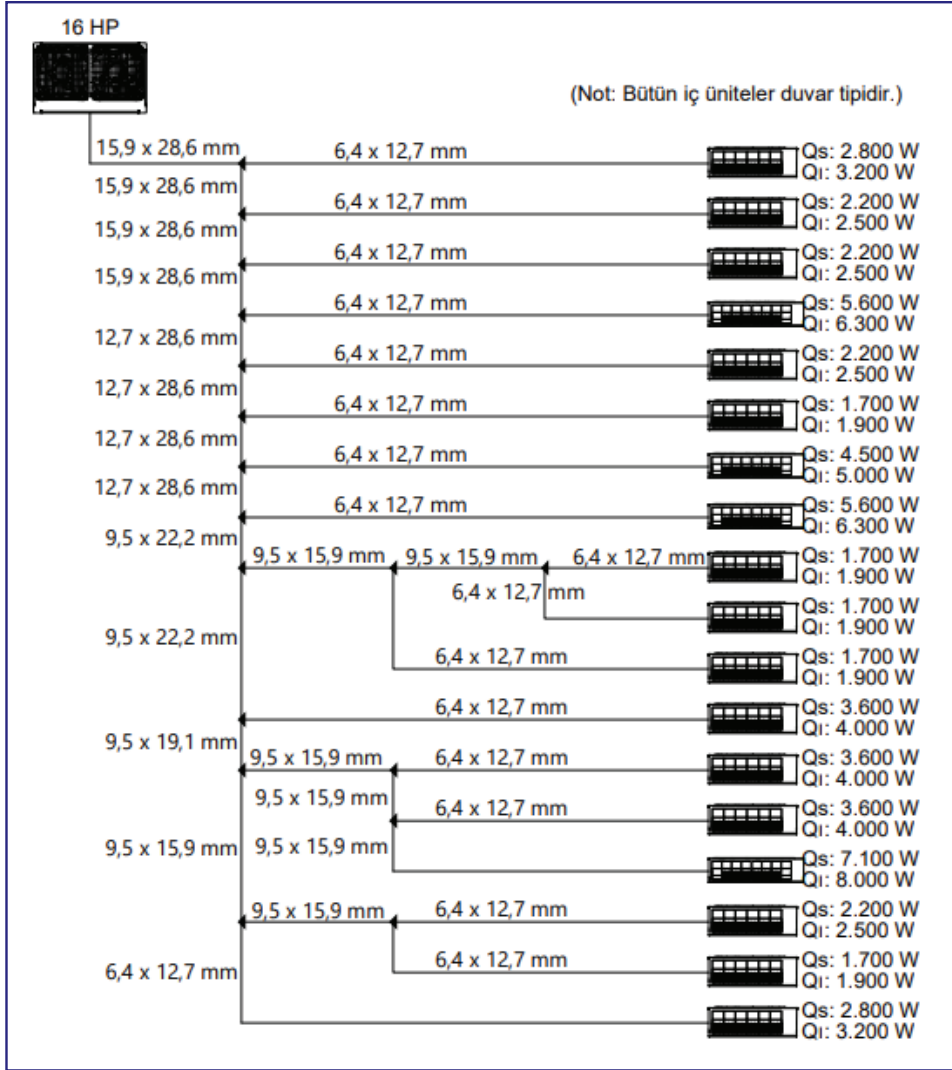
Tablo 6. İç Ünite Sayısı Ve Harcadıkları Enerji Miktarları

İç Ünite Adı	Elektrik Gücü (kW/adet)	İç Ünite Adedi
I.U.D.15	0,017	6
I.U.D.20	0,019	4
I.U.D.25	0,028	1
I.U.D.32	0,030	3
I.U.D.40	0,020	1
I.U.D.50	0,040	1
I.U.D.63	0,050	1

2.3. Sistem Şemaları

2.3.1 VRF sistemi tesisatı proje çalışması

Binanın VRF sistemi ile şartlandırılması durumunda binanın iç üniteleri duvar tipi iç ünite seçilmiştir. Bina konut olarak kullanılacağından, dış ünite olarak bir adet 2 borulu dış ünite kullanılmıştır. İç ünitelerin yerleşimleri yapılırken, sadece aydınlatmadan dolayı ısı kazancının olacağı koridor gibi mahallere iç ünite yerleştirilmemiştir. Binanın VRF sistemi tesisat kolon şeması ve sistemde kullanılan iç ve dış ünite kapasite bilgileri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. VRF sistemi projesi kolon şeması

2.3.2. Topraklı kaynaklı ısı pompası yerden ısıtma/serinletme sistemi tesisatı proje çalışması

Sistemde kullanılan toprak kaynaklı ısı pompası sistemi, binanın ısı kazancı ve ısı kaybı hesapları göz önüne alınarak seçilmiştir. Sistemde iki adet ısı pompası kullanılmıştır. Seçilen toprak kaynaklı ısı pompasının özellikleri Tablo 7'deki gibidir. Binanın yerden ısıtma/serinletme sistemi ile şartlandırıldığında döşeme sıcaklığını homojen bir şekilde dağıtabilmek için borular salyangoz tipinde döşenmiştir. Yapılan ısı kazancı ve ısı kaybı hesaplarına göre her mahal için yere döşenecek boruların arasındaki mesafeler belirlenmiştir. Sistemin kolon şeması Şekil 5'te gösterilmektedir.

Tablo 7. Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Özellikleri

Soğutma kapasitesi	36,000 Watt
Soğutma için toprak sıcaklığı	15 °C DB
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı	16 °C DB
Soğutma kondenser basınç kaybı	0.75 bar
Dahili sirkülasyon pompası debisi	6.192 m ³ /h
Isıtma kapasitesi	35,500 Watt
Isıtma için toprak sıcaklığı	6 °C DB
Isıtma suyu çıkış sıcaklığı	50 °C DB
Isıtma kondenser basınç kaybı	1.10 bar
Dahili sirkülasyon pompası debisi	3.053 m ³ /h
Elektrikli ısıtıcı kapasitesi	7.0 kW
Elektrikli ısıtıcı sayısı	2 Adet (1'i yedek)
Maksimum işletme basıncı	6 bar
Elektrik tüketimi	8.84 kW
Genişlik	600 mm
Derinlik	620 mm
Yükseklik	1,800 mm
Ağırlık	345 kg

Tablo 8. Kolektörlere Bağlanan Boru Sayıları ve Kolektör Adetleri

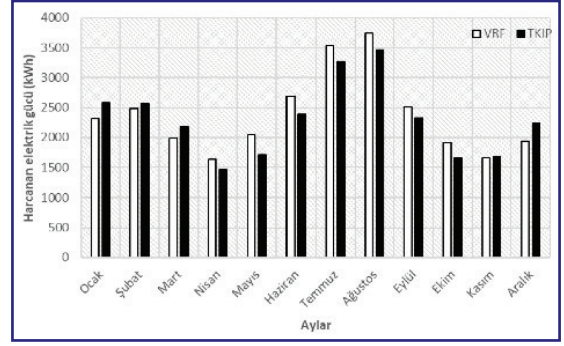
Kolektöre bağlanan boru sayısı	Kolektör Adetleri
2 ağızlı	11
3 ağızlı	2
4 ağızlı	9
6 ağızlı	2

Kolektörlere bağlanacak boru sayısı ve çapları, boruların içindeki basınç kayıpları 20 Pa değerini aşmayacak şekilde dizayn edilmiştir. Herbir borunun uzunluğu da en fazla 90 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Kolektör sayıları ve bu kolektörlere bağlanan boru sayıları Tablo 8’de gösterilmektedir.

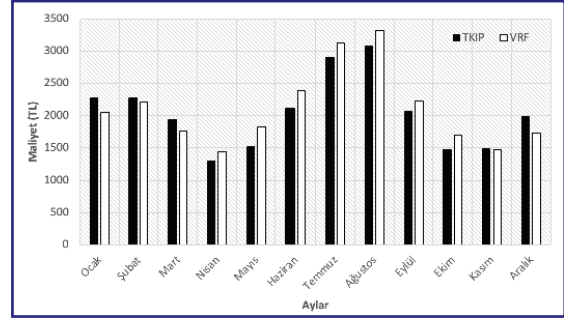
SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Toprak kaynaklı ısı pompasıyla çalışan yerden ısıtma/serinletme sistemi ve VRF sistemi için yapılan hesaplamalardan elde edilen aylık elektrik tüketim miktarı ve maliyetleri kıyaslaması Şekil 6-7’de gösterilmektedir. Elektrik fiyatları 2020 yılında mesken için kWh başına ortalama 0,71 TL olarak kabul edilmiştir.

Şekil 6 ve 7 incelendiğinde, sistemlerin elektrik tüketimleri yaz ve kış klimasında farklılık göstermektedir. VRF sisteminin kış aylarındaki maliyeti 5981 TL iken, TKIP sisteminin toplam maliyeti-

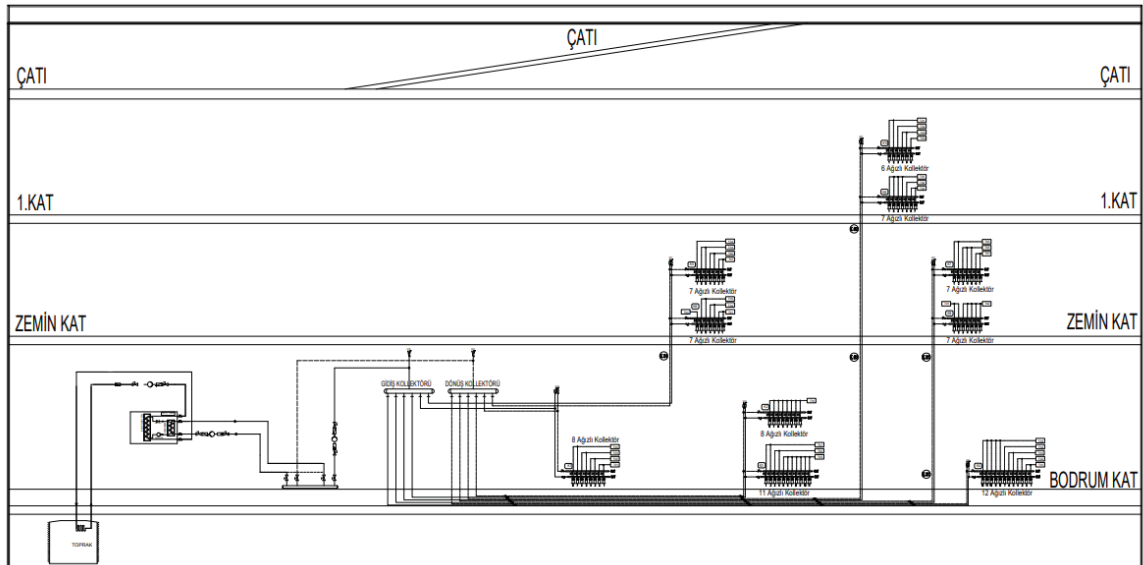


Şekil 6. VRF ile TKIP sistemlerinin aylık elektrik tüketim miktarlarının karşılaştırması



Şekil 7. VRF ile TKIP sistemlerinin aylara göre elektrik tüketim maliyeti (TL)

ti 6530 TL olmaktadır. Böylece VRF sistemi kış aylarında TKIP sistemine göre %9 daha avantajlı olduğu görülmektedir. VRF sisteminin yaz aylarındaki maliyeti 8825 TL iken, TKIP sisteminin toplam maliyeti 8080 TL olmaktadır. Buna göre



Şekil 5. Toprak kaynaklı ısı pompası yerden ısıtma/serinletme sistemi projesi kolon şeması

yaz aylarında durumun tam tersi toprak kaynaklı ısı pompasının VRF sistemine nazaran %9 daha avantajlı olduğu görülmektedir. Güz döneminde ise havanın nispeten sıcak olduğu eylül ekim aylarında VRF sisteminin tüketimi %7 fazla olup, bahar aylarında havanın ısınmasıyla birlikte TKIP ile VRF sisteminin tüketim farkı %5 mertebelerinde çıkmaktadır. VRF Sisteminin TKIP sistemine göre en

avantajlı olduğu Ocak ayında bile aradaki fark %11 mertebelerinde iken, TKIP sistemi tüketiminin VRF sistemine göre en düşük olduğu mayıs ayında aradaki fark %20 mertebesinde dir. Bu sebeplerle genel olarak TKIP, VRF sisteme göre daha avantajlıdır. TKIP pompası sisteminin yıl boyu harcadığı toplam elektrik tüketimi miktarı 27524 kWh olup, VRF sistem ise yıl boyunca 28449 kWh tüketim

Tablo 9. Kolektör Maliyeti Hesaplaması

Kolektör ağız sayısı	Birim Fiyat (TL)	Miktar	Toplam Fiyat (TL)
2	148.34	11	1631.78
3	200.38	2	400.75
4	257.76	9	2319.84
6	372.72	2	745.44
TOPLAM			5097.82

Tablo 10. İlk Yatırım Maliyeti Hesaplaması

	Birim Fiyat (TL)	Miktar	Toplam Fiyat (TL)
Borulama (dikişli)	596.74	1	596.74
Borulama (pex)	6.71	8006	53704.25
Kolektör	5097.82	1	5097.82
Isı pompası (36 kW)	109860	1	109860
Pompa	4274.08	1	4274.08
Toprak tarafı boru	40	2160	86400
İşçilik	2000	1	2000
TOPLAM			261932.89

Tablo 11. İç Ünitelerin Maliyet Hesaplamaları

Duvar tipi	Birim Fiyat (TL)	Miktar	Toplam Fiyat (TL)
15	3204	6	19224
20	3204	5	16020
25	3396	1	3396
32	3516	3	10548
40	3636	1	3636
50	3840	1	3840
63	4068	1	4068
TOPLAM			60732

Tablo 12. İlk Yatırım Maliyeti Hesaplamaları

	Birim Fiyat (TL)	Miktar	Toplam Fiyat (TL)
İç üniteler	60732	1	60732
Dış ünite (16 HP 2 borulu)	54984	1	54984
Borulama (işçilik dahil)	15008.64	1	15008.64
Joint	402	34	13668
Kumanda	621.60	18	11188.80
Merkezi kumanda	8052	1	8052
TOPLAM			163633.44

yapmaktadır. Sadece soğutma şartlarını dikkate aldığımızda TKIP sistemi soğutma yapılan aylar boyunca toplam tüketimi 9122 kWh olmakta iken VRF sisteminin toplam tüketim değeri 9967 kWh olmaktadır. Buradan görüldüğü üzere TKIP sistemi soğutma şartlarında %9 oranında daha avantajlıdır. Isıtma durumunda ise TKIP sisteminin toplam tüketimi 7379 kWh iken VRF sisteminin toplam tüketimi 6744 kWh olmaktadır. Buna göre VRF sistemi TKIP sistemine göre %9 daha avantajlıdır. TKIP sisteminin yıl boyunca toplam elektrik tüketim maliyeti 24383 TL iken, VRF sistemi için bu değer 25207 TL olmaktadır. Ancak sadece soğutmanın yapıldığı bahar ve yaz aylarını dikkate aldığımızda TKIP sisteminin tüketim bedeli 14432 TL olup, VRF sisteminin tüketim bedeli 16000 TL olmaktadır. Görüldüğü üzere TKIP sistemi yaklaşık %9.8 oranında kazanç sağlamaktadır. Isıtmada ise tam tersi bir durum söz konusu olup, TKIP sisteminin tüketim bedeli 9950 TL olup, VRF sisteminin tüketim bedeli ise 9206 TL'dir. Buradan da görüldüğü üzere, ısıtma durumunda VRF sistemi %7.5 oranında daha avantajlı olmaktadır.

Sistemler yatırım maliyetleri açısından da incelenmiştir Sistemlerin yatırım maliyetleri hesaplanırken Çevre ve Şehircilik Bakanlığının inşaat birim fiyatlandırma verilerinden faydalanılmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin ilk yatırım maliyeti hesaplamaları Tablo 9-10'da verilmiştir.

VRF sisteminin ilk yatırım maliyeti hesaplamaları Tablo 11-12'de verilmiştir.

Hesaplanan maliyetler projelendirilen bina için, TKIP kullanılması durumunda, 261932.89 TL iken; VRF sistemi için 163633.44 TL'dir. Bakım maliyetleri ise her iki sistem için de 7500 TL olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar incelendiğinde, TKIP ilk yatırım maliyetleri, VRF sisteminden daha yüksek olmakla birlikte, işletme maliyetlerinde avantajlı olduğu görülmektedir.

Simgeler

q_u	: Üst döşemeden gelen ısı miktarı (W)
q_a	: Alt döşemeden gelen ısı miktarı (W)
S_u	: Üst ısı iletim şekil faktörü
S_a	: Alt ısı iletim şekil faktörü
Z_u	: Üst döşemeye olan uzaklık (m)
Z_a	: Alt döşemeye olan uzaklık (m)
R_u	: Üst ısı direnç ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
R_a	: Alt ısı direnç ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
T_{sm}	: Boru eksenindeki ortalama su sıcaklığı (K)
T_{yu}	: Üst döşemenin yüzey sıcaklığı (K)

T_{ya}	: Alt döşemenin yüzey sıcaklığı (K)
w	: Mahal içindeki boruların birbirine uzaklığı (m)
L	: Boru boyu (m)
T	: Suyun mahale giriş sıcaklığı (K)
T_{sg}	: Suyun mahalden çıkış sıcaklığı (K)
T_{sc}	: Döşemeyi oluşturan tabak kalınlığı (m)
l_i	: Döşemeyi oluşturan tabak kalınlığı (m)
k_i	: Tabaka kalınlıklarının ısı iletim katsayıları ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
h_i	: Taşınım katsayıları ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
Re	: Reynolds sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
Nu	: Nusselt sayısı
μ	: Dinamik viskozite (kg/ms)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
D	: Borunun dış çapı (m)
V	: Boru içindeki su hızı
C_p	: Özgül ısı ($J/kg \cdot ^\circ C$)
k	: Isı iletim katsayısı ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
\dot{m}	: Debi (kg/s)
\dot{Q}	: Isı (W)
ΔT	: Sistemden geçen suyun gidiş ve dönüş sıcaklıklarının farkı ($^\circ C$)
T_C	: Soğuk su giriş sıcaklığı ($^\circ C$)
T_H	: Sıcak su giriş sıcaklığı ($^\circ C$)
T_{max}	: Maksimum su giriş sıcaklığı ($^\circ C$)
T_{min}	: Minimum su giriş sıcaklığı ($^\circ C$)
$T_{a,min}$: Dış hava sıcaklığının yıl boyunca ulaşacağı en düşük sıcaklık ($^\circ C$)
$T_{a,max}$: Dış hava sıcaklığının yıl boyunca ulaşacağı en yüksek sıcaklık ($^\circ C$)
T_a	: Dış ortam hava sıcaklığı ($^\circ C$)

KAYNAKLAR

- [1] ASHRAE, ASHRAE Pocket Guide for Air Conditioning, Heating, Ventilation, Refrigeration. 219-238, 2017.
- [2] Bojić, M., Cvetković, D., & Bojić, L., Decreasing Energy Use and Influence to Environment by Radiant Panel Heating Using Different Energy Sources. Applied Energy, 138, 404-413, 2015.
- [3] Doğan, V. & Çalışır O., Döşemden (Yerden) Isıtma Sistemlerinde Hesap Yöntemi, 2012.
- [4] Gao, S., Li, Y., Zhao, M., Wang, Y., Yang, X., Yang, C., & Jin, L., Design Method of Radiant Cooling Area Based on the Relationship Between Human Thermal Comfort and Thermal Balance, Energy Procedia, 143, 100-105, 2017.
- [5] Kalmár, F., Impact of Elevated Air Velocity on Subjective Thermal Comfort Sensation Under Asymmetric Radiation and Variable Airflow Direction, Journal of Building Physics, 42(2), 173-193, 2018.
- [6] Kitagawa, K., Komoda, N., Hayano, H., & Tanabe, S. I., Effect of Humidity and Small Air Movement on thermal Comfort Under a

- Radiant Cooling Ceiling by Subjective Experiments, *Energy and Buildings*, 30(2), 185-193, 1999.
- [7] Košir, M., Krainer, A., Dovjak, M., Perdan, R., & Kristl, Ž., Alternative to the Conventional Heating and Cooling Systems in Public Buildings, *Journal of Mechanical Engineering*, 56(9), 575-583, 2010.
- [8] Lubis, L. I., Kanoglu, M., Dincer, I., & Rosen, M. A., Thermodynamic Analysis of a Hybrid Geothermal Heat Pump System, *Geothermics*, 40(3), 233-238, 2011.
- [9] Omer, A. M., Ground-Source Heat Pumps Systems and Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344-371, 2008.
- [10] Stetiu, C., Energy and Peak Power Savings Potential of Radiant Cooling Systems in US Commercial Buildings, *Energy and buildings*, 30(2), 127-138, 1999.
- [11] Tang, H., Liu, X. H., & Jiang, Y., Theoretical and Experimental Study of Condensation Rates on Radiant Cooling Surfaces in Humid Air, *Building and Environment*, 97, 1-10, 2016.
- [12] Türk Standartları Enstitüsü, TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları, 2013.
- [13] Zarrella, A., De Carli, M., & Peretti, C., Radiant Floor Cooling Coupled with Dehumidification Systems in Residential Buildings: A Simulation-Based Analysis, *Energy Conversion and Management*, 85, 254-263, 2014.
- [14] Zhang, L. Z., & Niu, J. L., Indoor Humidity Behaviors Associated With Decoupled Cooling in Hot and Humid Climates, *Building and Environment*, 38(1), 99-107, 2003.
- [15] Zhou, X., Liu, Y., Luo, M., Zhang, L., Zhang, Q., & Zhang, X., Thermal Comfort Under Radiant Asymmetries of Floor Cooling System in 2 h and 8 h Exposure Durations, *Energy and Buildings*, 188, 98-110, 2019.
- [16] Al-Rabghi, O. M. & Al-Johani, K. M., Utilizing Transfer Function Method For Hourly Cooling Load Calculations, *Energy Conversation Managment*, 319-332, 1996.