

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TOPRAK HAVA ISI DEĞİŞTİRİCİ KULLANIMI İLE BİR SERANIN PASİF
İKLİMLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SELÇUK UZUN

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ. MUSA ÖZKAN

BİLECİK, 2023

10515437

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TOPRAK HAVA ISI DEĞİŞTİRİCİ KULLANIMI İLE BİR SERANIN PASİF
İKLİMLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SELÇUK UZUN

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ. MUSA ÖZKAN

BİLECİK, 2023

10515437

BEYAN

“Toprak Hava Isı Değiştirici Kullanımı ile Bir Seranın Pasif İklimlendirilmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	
		X	
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Selçuk UZUN

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Musa ÖZKAN hocama değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına babam Adnan UZUN, annem Ayşe Döndü UZUN ve eşim Tuba Erdoğan UZUN'a şükranlarımı sunar teşekkür ederim.

Selçuk UZUN

2023



ÖZET

TOPRAK HAVA ISI DEĞİŞTİRİCİ KULLANIMI İLE BİR SERANIN PASİF İKLİMLENDİRİLMESİ

Bu çalışmayla tarım sektörü faaliyetleri arasında yer alan sera üretimindeki iklimlendirme koşulları araştırılmış, enerji verimliliğinde iyileştirme yapılması amaçlanmıştır. Eskişehir ilinde (Türkiye) toprak hava ısı değiştiricisi (THID) sistemi kullanılarak bir seranın pasif iklimlendirme sisteminin sayısal analizi amaçlanmıştır. Tarım sektörünün bir parçası haline gelen seracılıkta yaz ve kış mevsimlerinde de üretimin aksamadan devam etmesi amacıyla bu çalışma kapsamında uzunluğu 66 metre, et kalınlığı 0,002 metre ve çapı 0,2 metre olan alüminyum boru kullanılmıştır. Toprak hava ısı değiştiricisine 0°C ile giren dış ortam havasının sıcaklığı sistem çıkışında 19°C yükseltilecek sera içerisine bu sıcaklıkta girmesi sağlanmıştır. SST k- ω (Omega) türbülans yöntemi kullanılarak çözümleme yapılmıştır. Toprak hava ısı değiştiricisiyle entegre bu serada ısı eşanjörü ($h=3$) metre derinliğe gömülmüştür. Güneş ışınımı kaynaklı seraya kış aylarında ortalama 170 W/m² ısıtım miktarı düşerek ek ısıtım sağlanmıştır. Dolayısıyla sera için ihtiyaç duyulan sıcaklık elde edilmiştir. Sistemin doğal taşınımli pasif ısıtması yapılmıştır. Sera içindeki tüm havanın değişmesi için geçen süre 17 saat olarak bulunmuştur. Maliyet analizi sonucu amortisman süresi 18 ay olarak hesaplanmıştır. Matematiksel model kullanılarak, enerji tasarrufu, verimliliği ve de maliyet yönünden faydaları bu çalışmada ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pasif İklimlendirme, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Toprak Hava Isı Değiştiriciler, Seralar, Enerji Tasarrufu.

ABSTRACT

PASSIVE AIR CONDITIONING OF A GREENHOUSE WITH THE USE OF A SOIL AIR HEAT EXCHANGER

With this study, the climate conditions in greenhouse production, which is among the agricultural sector activities, were investigated and it was aimed to improve energy efficiency. Numerical analysis of passive air-conditioning system of a greenhouse using earth-air heat exchanger (THID) system in Eskişehir province (Turkey) is aimed. In order to continue the production without interruption in summer and winter seasons in greenhouse cultivation, which has become a part of the agricultural sector, aluminum pipes with a length of 66 meters, a wall thickness of 0,002 meters and a diameter of 0,2 meters were used within the scope of this study. The temperature of the outdoor air entering the ground-air heat exchanger at 0°C was increased by 19°C at the system exit and it was ensured to enter the greenhouse at this temperature. Analysis was performed using the SST k- ω (Omega) turbulence method. In this greenhouse integrated with the ground-air heat exchanger, the heat exchanger is buried at a depth of (h=3) meters. Additional heating was provided to the greenhouse, which is caused by solar radiation, by decreasing the amount of radiation of 170 W/m² in winter. Therefore, the required temperature for the greenhouse was obtained. Natural convection passive heating of the system was made. The time taken for all the air in the greenhouse to change was found to be 17 hours. As a result of the cost analysis, the amortization period was calculated as 18 months. Using the mathematical model, energy saving, efficiency and cost benefits are discussed in this study.

Keywords: Passive Air Conditioning, Computational Dynamics Of Execution, Ground-Air Heat Exchangers, Greenhouses, Energy Saving.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİ	5
2.1. Jeotermal (Toprak) Enerjisi	6
3. PASİF İKLİMLENDİRME	9
3.1. Pasif İklimlendirme Sistemleri	9
3.1.1. Toprak Kaynaklı Pasif Isıtma Sistemi	10
3.1.1.1. İklim Koşulları ve Coğrafi Konum	11
3.1.1.2. Toprak Tipi	11
3.1.1.3. Boru Özellikleri.....	11
3.1.1.4. Gömü Derinliği	11
3.1.1.5. Hava Akışı	11
4. TOPRAK HAVA ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN TANITILMASI.....	12
4.1. Toprak Hava Isı Değiştirici Sistemi	12
4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)	12
4.3. Toprak Hava Isı Değiştirici Çözümlemesi.....	13
5. YÖNETİCİ DENKLEMLER VE TÜRBÜLANS MODELİ.....	14
5.1. Süreklilik ve Navier – Stokes Denklemleri.....	14
5.2. Süreklilik Denklemi	14
5.3. Navier Stokes Denklemleri	14
5.4. Enerji Denklemi.....	15
5.5. Türbülans Modeli	15
5.6. SST k- ω (Omega) Modeli.....	15

5.7. Reynolds Sayısı	16
6. BORU VE SERANIN TASARLANMASI	18
6.1. Toprak Hava Isı Değiştirici (THID) Sisteminin Seraya Entegre Hali	18
6.2. Toprak Hava Isı Değiştiricisinin (THID) Geometrisi	18
6.3. Sera Çadır Tipinin Seçilmesi	20
6.3.1. Sera Çadır Tipleri	20
6.4. Çadır Tipi	21
7. SAYISAL ÇÖZÜMLEME	23
7.1. Sınır Koşulları	23
7.2. Çıktılar	24
7.3. THID Sistemi Akış Tipi	25
8. SAYISAL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	27
8.1. Sonuçların İncelenmesi	27
9. MALİYET ANALİZİ	31
9.1. İhtiyaç Duyulan Enerjinin Hesaplanması	31
10. SONUÇ	32
KAYNAKÇA	33

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompasının görünümü	6
Şekil 2.2. Toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana göre değişimi	7
Şekil 3.1. Tipik bir Toprak-Hava Isı Değiştiricisi (THID) Sistemi	10
Şekil 4.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin temel aşamaları	13
Şekil 6.1. THID modelinin seraya entegreli şematik çizimi	18
Şekil 6.2. Borunun şematik iki boyutlu görünüşü	19
Şekil 6.3. THID sisteminde kullanılacak olan $\varnothing=200$ mm alüminyum borunun geometrisi	20
Şekil 6.4. Ele alınan sera tipleri; (a) yay çatılı sera (A tipi), (b) beşik çatılı sera (B tipi), (c) yüksek tünel tip sera (C tipi)	21
Şekil 6.5. THID sisteminde kullanılacak olan seranın ölçüleri	22
Şekil 7.1. Borunun giriş ve çıkış yerleri	23
Şekil 7.2. Boruda oluşan ısı iletim ve taşınım bölgeleri	23
Şekil 7.3. THID sisteminde kullanılacak olan seranın şematik ön görünüşü	24
Şekil 7.4. Seraya entegreli THID sisteminin üç boyutlu görünümü	25
Şekil 8.1. Sera iç kesit sıcaklık konturu	27
Şekil 8.2. Seraya giriş hız vektörleri konturu	28
Şekil 8.3. Yatay boruların kesit basınç konturu	29
Şekil 8.4. Yatay boruların kesit sıcaklığı konturu	30

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

COP	: Coefficient of Performance
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
PVC	: Poli Vinil Klorür
THİD	: Toprak Hava Isı Değiştiricisi
TKİP	: Toprak Kaynaklı Isı Pompası
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
SST	: Shear Stress Transport
Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
c	: Havanın özgül ısısı (J/kg.K)
D	: Boru çapı (mm)
μ	: Akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s)
ϵ	: Yayılma hızı (m/s)
ω	: Türbülans frekansı (Hz)
h	: Gömülü boru derinliği (m)
H	: Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
j	: Joule

k	: Türbülans kinetik enerjisi
K	: Kelvin
K₁	: Isı iletim katsayısı (W/m ² K)
kg	: Kilogram
kw	: Kilowatt
kwh	: Kilowatt saat
L	: Toplam boru boyu uzunluğu (mm)
m	: Kütleli debi (kg/s)
m	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
mm	: Milimetre
P	: Basınç (Pa)
Pa	: Pascal
Re	: Reynolds sayısı
ΔT	: Sıcaklık farkı (K)
s	: Saniye
S	: Boru et kalınlığı (mm)
St	: Çelik
T	: Sıcaklık (K)
T_{ij}	: Reynolds gerilmesi
TL	: Türk lirası

u : x yönündeki anlık hız bileşeni (m/s)

Q : Isı miktarı (Watt)

v : y yönündeki anlık hız bileşeni (m/s)

V_{ort} : Akışkanın ortalama hızı (m/s)

w : z yönündeki anlık hız bileşeni (m/s)

W : Güç (Watt)

α : Isıl yayılım katsayısı (m^2/s)

ν : Akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s)

ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)

q'' : Işınım miktarı (W/m^2)

$^{\circ}C$: Santigrat derece

$\emptyset$: Çap

Φ : Viskoz dağılım fonksiyonu

1. GİRİŞ

Sera kullanımı ülkemizde sıklıkla uygulanan bir tarımsal üretim yöntemidir. Bu seraların içerisinde yetiştirilen bitkiye uygun olarak ısıtılması veya soğutulması gerekmektedir. İnsan topluluklarının gelişme süreçlerinin yanında enerji isteği tüm dünyada hızlı bir şekilde artmaktadır. Ancak kaynakların sınırlılığı insanlığı farklı arayışlara itmektedir. Enerji depolama ve enerji tasarrufu teknolojilerinin geliştirilmesi önemli bir araştırma haline gelmektedir. Buna paralel olarak nüfus bir hayli artmaya devam etmekte, gıda endüstrisi insanlık adına büyük bir meydan okuma olarak sahaya çıkmaktadır. Saha da birtakım sorunlarla yüzleşmek zorunda bulunmaktadır. Tarım adına da mevsimsel geçişlerle ilgili olarak seracılık faaliyetleri geliştirilmiştir. Serada enerji tüketimini azaltarak, birçok sera günümüzde enerji tasarruflu toprak hava ısı değiştiricisi (klima sistemi THID) ile geliştirilmeye devam etmektedir (J. Chen vd., 2015: 46-54).

Bu çalışmada yere gömülü seraya entegreli toprak hava ısı değiştiricisinin giriş ve çıkış sıcaklıkları sera tavanı, ön, arka ve yan duvarlarına düşen ısıtım miktarları, boru çap ve et kalınlığına bağlı termal performansı, hava ısı taşınımı, ısı iletimi, hız, basınç ve sıcaklık konturları incelenecektir.

Sistemin ısı çıkışını etkileyen önemli değişkenler, gömülü borunun uzunluğu, yarıçapı, derinliği ve gömülü borudaki hava akış hızıydı. Farklı uzunluklarda, boruların kullanıldığı simülasyon sonuçlarında daha uzun borularda daha yüksek soğutma verimi elde edilmiştir. Ayrıca çeşitli yarıçaplar için yapılan simülasyon sonuçlarında çap arttıkça çıkış havası sıcaklığının azaldığı gözlemlenmiştir (Wu vd., 2007:1462-1471).

THID sisteminin, yaz mevsiminde tipik bir evde soğutma için enerji tüketimini %30'a kadar azaltma konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğu bulunmuştur (Al-Ajmi vd., 2006:235-244).

Hava akışını ve termal performansını belirlemek için çeşitli araştırmalarda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı kullanılmıştır. Yükseklik, kanal uzunluğu, giriş boyutu, genişlik, hava hacimsel hızı, çalışma modu ve sıcaklık farkı ısı taşınımı için etkili koşullar olarak belirlenmiştir. Yerel ısı transfer fraksiyonlarının, topraktaki enerji akışını ve THID sistemindeki fazla enerjiyi izlemek için çok önemli olduğu saptanmıştır (Zhang ve Haghighat, 2009:1892-1898).

Isı eşanjörünün toprak ve atmosferik koşullar altındaki termal özellikleri incelenmiştir. Yerden havaya ısı eşanjörünün termal performansını simüle etmek için bir bilgisayar programı

geliştirilmiştir. Isı eşanjörü yüksek yoğunluklu polietilenden imal edilmiştir. Dış çapı 200 mm ve et kalınlığı 7,7 mm'dir. Çalışma sırasında ısıtma işlemi için ısı eşanjörünün uzunluğu incelenmiştir. Isı ve nemin doğrudan ısı eşanjörünü toprak ve besleme havası arasındaki etkileşiminin ısı transferi verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (Gan, 2014:12-22).

Atina'nın kentsel ısıtma sisteminin termal verimliliğini değerlendirmek için bir sinir ağı yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca yapay sinir ağı modeli kullanılarak her bir girişin iklim koşullarına verdiği tepki baz alınarak yeraltı borularının çıkış sıcaklıkları incelenmiş ve çıkış sıcaklığının bilinmesi için en önemli koşulun zemin sıcaklığı olduğu belirlenmiştir (Mihalakakou, 2003:917-927).

Deneysel ve HAD simülasyonları kullanarak bir THID kaynağına sahip ısı eşanjörünün termal verimliliği analiz edilmiştir. Çalışmalarında, toprak boru yarı çapının ısı geçirgenliğine, zamanın etkisi ve toprak ısı eşanjörünün ısı performansına akış hızının etkisi zaman koşulları altında test edilmiştir. Aşırı akış hızının, toprak ısı eşanjör düzeneğinin termal kalitesinde bir değişikliğe ve kontrolden çıkmasına neden olduğu tespiti yapılmıştır (Misra vd., 2013:266-277).

Toprak ısı eşanjör sisteminin kış aylarındaki ısı performansını deneysel olarak ve HAD modellemesi kullanılarak değerlendirilmiştir. Toprak hava ısı eşanjörünün ısı performansı test edilmiştir. Zeminin ısı iletkenliğinin 0,52 W/m²K olduğu yerde, sıcaklık artışı kararlı durumda 19,6 K ve 10 cm çapında ve 6000 cm uzunluğunda bir toprak hava ısı eşanjöründe akış ile aralıklı çalışmada 24 saat sonra 17,2 K olarak bulunmuştur (Misra vd.,2013:76-85).

Isı kaynağı olarak toprağın kullanıldığı bir ısı pompası sistemi üzerinde çeşitli analizler yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonrasında hem numerik hem de deneysel olarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, 2002 – 2003 kış sezonu için THID sisteminin sayısal ortalama verimi 3,2 olarak bulunmuştur (Esen vd., 2007:1126-1137).

Bir jeotermal ısı pompası kompleksinin soğutma kapasitesi incelenmiştir. 16,24 m² alana sahip test odası mevcuttur. Isı eşanjörü 2 metre derinliktedir. Borular arası mesafe 0,3 metredir. Boru çapı 0,016 metredir. Kompleksin ortalama soğutma kapasitesi 2,01 olarak ortaya çıkmıştır. Analitik ölçümlerle elde edilen sonuçlarda, bu bileşiğin Elâzığ iklim koşullarında mümkün olan en düşük maliyetle güvenilir ve verimli bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür (İnalı vd., 2005:1411-1424).

Girişteki hava sıcaklığı oda sıcaklığına eşit alınmıştır. Sonuç olarak dikey bir yüzeyde 300- 700 W/m² güneş ışınlamında havalandırma gücünün 55 – 150 m³/h debiye karşılık geldiği ve hava debisinin artmasıyla lineer olarak arttığı bulunmuştur (Mathur vd., 2006:927-935).

Serayı soğutmak amacıyla tasarlanmış THID sisteminin ekserjetik performans değerleri incelenmiştir. Havanın giriş ve çıkış sıcaklığı bakır-konstantan termokupl (PT-100) kullanılarak ölçülmüştür. Girişindeki hava sıcaklığı 314,22 K olarak gerçekleşmiştir. Giren ve çıkan hava arasındaki en büyük ortalama sıcaklık farkı yaklaşık 4,22 K olmuştur (Özgener, 2010:2804-2811).

THID fotovoltaiik kompleksinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sera için yapılan tesisatta gömülü boru çapı 0,56 metre, boru boyu 47 metre ve seraya bağlanmak için kullanılan boru çapı 0,8 metre, boru boyu 15 metre olup, deney esnasında soğutma kapasitesi 10,09 kW olarak belirlenmiştir. Bu düzeneğin maksimum 16,93 kW soğutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir (Özgener, 2011:4483-4490).

İtalya, Imola'daki bir okul binası için tasarlanan ve kurulan bir THID sisteminin 12 aylık ölçümü rapor edilmiştir. THID sistemindeki borunun toplam uzunluğu 2240 m, borunun çapı ise 0,25 m'dir. Kompleks, İtalya ülkesinde uygulanan en büyük projelerden biridir. Yaz ve kış aylarında giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır (Chiesa vd., 2014:563-570).

Toprağın 1,5-3 m derinliğinde borular döşenerek inşa edilen boru kompleksinin teorik ve pratik değerlendirmesi yapılmıştır. Çin'deki Nottingham Üniversitesi'nde inşa edilen böyle bir THID sisteminin pik ısıtma ve soğutma yükleri sırasıyla %62 ve %86 oranında pozitif katkı sağladığı ve 3,2-3,53 COP değerine sahip olduğu bulunmuştur (Darkwa vd., 2011:728-736).

Almanya'daki ofis binaları için tasarlanan üç farklı çaptaki THID sistemi enerji verimliliği açısından değerlendirilmiştir. Isı eşanjör sistemi çeşitli killi topraklara kurulmuştur. Boru çapı 200, 250 ve 350 mm olup, THID sistemlerinde kontrol mekanizmasının çok önemli olduğu vurgulanmıştır. Bu test sistemlerinde güç tüketimi açısından daha uygun olduğu belirtilmiştir (Pfafferott, 2003:971-983).

Taylant'ta 30 m²'lik bir serada 0,08 m çapında ve 38,5 m uzunluğundaki PVC borular 1 m derinliğe gömülerek iklimlendirme amacıyla kullanılmıştır. Yılın mevsimleri için verim değerleri hesaplanmış ve yatay olarak döşenen bir PVC boru sisteminin yazın soğutma ihtiyacını %74,84'e kadarını sağladığı tespit edilmiştir (Mongkon vd., 2013:104-111).

Kapalı devre şeklinde bulunan toprak hava ısı değiştiricili seranın iklimlendirme kompleksinin gücünün analizi, değerlendirmesi ve modellenmesi yapılmıştır. THID kompleksinin genel enerji verimliliği 0°C'lik bir başlangıç durum sıcaklığında %72,10 olarak hesaplanmış ve genel enerji verimliliği %19,18 olarak bulunmuştur (Hepbaşlı, 2013:224-230).

İzmir'de seraların ısıtılmasında kullanılan THID sisteminin ekserji ekonomik analizi yapılmıştır. Sonuçlar, termodinamik ve ekonomik koşulların THID için önemli olduğunu vurgulamaktadır. Ortalama COP ve enerji verimliliği sırasıyla %10,51 ve %89,25 olarak hesaplanmıştır (Özgener ve Özgener, 2011:960-965).

THID araştırmalarının deneysel, teorik ve sayısal olarak yapıldığı literatür araştırmasında görölmektedir. Bu çalışma kapsamında SST k- ω (Omega) türbölans yöntemi kullanılmıştır. Toprak hava ısı değiştirici sistemi kullanılarak doğal taşınım ile bir seranın pasif iklimlendirilmesi amaçlanmıştır.

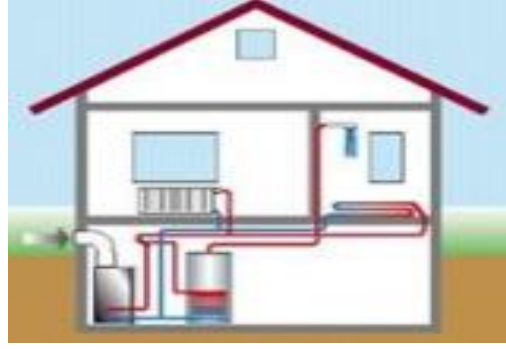
2. İKLİMLENDİRME SİSTEMLERİ

İklimlendirme en genel anlamıyla havanın soğutulması, ısıtılması, nemlendirilmesi, neminin alınması yani havanın şartlandırılması işlemine denir. İklimlendirme sistemi seçilirken kullanıcı konforu, proses ısıtma, alan ısıtma, soğutma, havalandırma kriterleri başta olmak üzere aşağıdaki parametreler göz önünde bulundurulmalıdır;

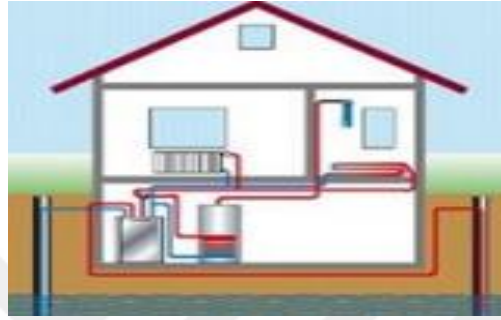
- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| • Sıcaklık | • Mekansal gereksinimler |
| • Saatte hava değişimi | • Esneklik |
| • Nem | • Güvenlik endişeleri |
| • Hava ve/veya su hızı | • Kontrol edilebilirlik |
| • Hava hareketi | • İlk maliyet |
| • Yerel iklim | • Yaşam döngüsü analizi |
| • Hava temizliği veya kalitesi | • Enerji maliyetleri |
| • Operatör işçilik maliyetleri | • Tasarımın sürdürülebilirliği |
| • Alan basıncı gereksinimleri | • Akustik ve titreşim |
| • Bakım maliyetleri | • Küf ve küf önleme |
| • Yük hesaplama | • Güvenilirlik |

İklimlendirme sistem seçiminde parametreler birbiriyle ilişkili olduğundan uygulamada her biri ayrı ayrı ele alınsa da birbirini nasıl etkilediği dikkate alınmalıdır (Özdemir vd., 2017).

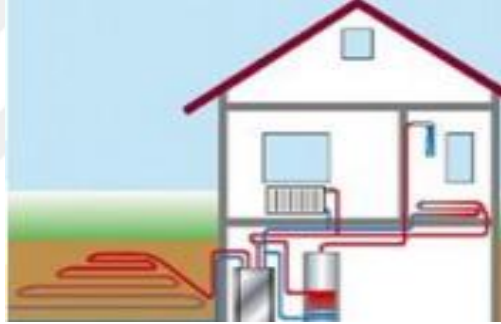
Isı pompası teknolojisi günümüzde merkezi ve bireysel iklimlendirme sistemlerinin neredeyse tamamında faydalanan bir uygulamadır. Hem ısıtma hem soğutma çevrimini gerçekleştirebilen ve yüksek bir etkinliğe sahip ısı pompaları kullanılan ısı kaynağına göre hava, toprak ve su kaynaklı ısı pompası olarak adlandırılır (Kocatürk ve Salman, 2006). Şekil 2.1’de kullanılan ısı kaynağına göre farklı ısı pompaları gösterilmektedir (Aytaç, 2021).



a) Hava kaynaklı



b) Su kaynaklı



c) Toprak kaynaklı

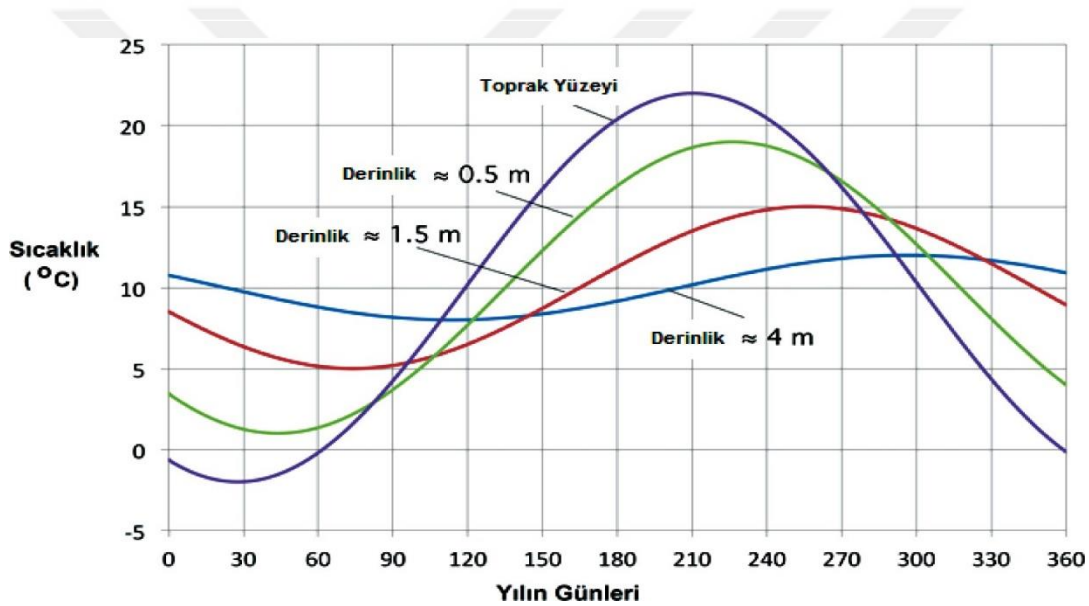
Şekil 2.1. Hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompasının görünümü

Kaynak: (Aytaç, 2021)

2.1. Jeotermal (Toprak) Enerjisi

Bilimsel anlamda yenilenebilir enerji kaynakları sayılırken bunlar arasında toprak enerjisi yerine genel olarak jeotermal enerji ifadesi geçmektedir. Jeotermal enerji küçük ölçekli ısıtma soğutma işlemlerinden sera uygulamalarına, ısı pompası sistemlerinden büyük kapasiteli enerji santrallerine kadar birçok farklı çalışmada kullanılmaktadır. Jeotermal enerji uygulamalarına göre daha düşük toprak derinliğine sahip ve daha küçük kapasitelerdeki ısı enerjisi çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynağı olarak toprak enerjisi (soil, earth, ground vb.) ifadesi de kullanılmaktadır.

Toprak enerjisi düşük ve orta kapasiteli ısıl enerji uygulamalarında faydalanılabilecek, kolay erişim olanaklarına sahip ve herhangi bir çevresel probleme yol açmayan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Toprak sıcaklığı belirli bir derinlikte yıl boyunca neredeyse sabit bir değerdedir. Şekil 2.2’de Toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana göre değişimi gösterilmektedir. Dış ortam havasına göre belirli bir derinlikteki toprak sıcaklığının değişiminin düşük olması, yaz ve kış dönemlerinde ısıtma ve soğutma uygulamalarında bu enerji kaynağından faydalanılmasına imkân sağlamaktadır (Bulut vd., 2016:55). Belirli bir derinlikteki toprak sıcaklığı kış döneminde dış hava sıcaklığından daha yüksek, yaz döneminde ise daha düşüktür. Bu sıcaklık farkından faydalanılarak hava, toprak altına yerleştirilmiş boru veya kanallardan geçirilerek, kış döneminde ısıtılır, yaz döneminde ise soğutulur (Bulut vd., 2016:55).



Şekil 2.2. Toprak sıcaklığının derinliğe ve zamana göre değişimi

Kaynak: (Bulut vd., 2016:55)

Isıtma veya soğutma uygulamaları için toprağa yerleştirilen borulardan akışkan geçirildiğinde bu sisteme toprak ısı değiştirici veya toprak kaynaklı ısı değiştirici denir (Söğüt ve Karakoç, 2013). Kullanılan ısı transfer akışkanına göre bu sistemler Toprak Hava Isı Değiştirici (THID) ve Toprak Kaynaklı Isı Pompası (TKIP) olarak iki kategoride sınıflandırılabilir. THID sistemleri ile TKIP sistemleri arasındaki temel fark, THID sisteminde hava kullanılması, TKIP sisteminde ise ısı transfer akışkanı olarak sıvı (su/donma önleyici sıvı/soğutucu akışkanlar) kullanılmasıdır (Töre ve Kılıçarslan, 2016).

Genellikle, THID boruları 1-5 m derinliğe yatay olarak kurulurken, TKIP boruları 20-200 m aralığında dikey olarak kurulur. TKIP hemen hemen tüm hava koşullarında ve tüm dünyada uygulanabilen bir sistem özelliği taşıırken, THID'in muson ikliminde ve nemli iklim koşullarında kullanımı uygun değildir. Kurulum ve işletme maliyetlerine gelince THID sisteminin TKIP sistemine göre çok daha uygun olduğu görülmektedir. Ancak THID sisteminin verimliliği TKIP'den daha düşük olduğundan, TKIP sisteminin daha yaygın bir kullanıma sahip olduğu görülmektedir (Yamankaradeniz vd., 2012).

Toprak çok yüksek bir enerji potansiyeline sahiptir. Günümüzde bu potansiyelden faydalanmak için birçok farklı uygulama kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında toprak altına yerleştirilen boru sistemi ve boru sisteminden havanın geçmesi için kullanılan bir Toprak-Hava Isı Değiştirici (THID) ile toprağın sahip olduğu ısı enerjiden fayda sağlamak amaçlanmıştır.

3. PASİF İKLİMLENDİRME

Sağlıklı yapılı çevre, ölçeği ne olursa olsun, insanın fiziksel, sosyal ve ekonomik ihtiyaçlarını en üst düzeyde karşılayan alt sistemler bütünüdür. Böyle bir alt sistem pasif iklimlendirmedir. Seraları ve binaları doğal iklimlendirme alt sistemi olarak tasarlanmanın amacı, insanların iklimsel ihtiyaçlarını minimum ek enerji gerektirecek düzeyde karşılamak için doğal koşulları kullanmaktır. Dolaylı amaç ise minimum enerji tüketimi, kaynakların optimal kullanımı ve sürdürülebilir bir yaşam alanı oluşturulması ile kirli atıkları ve çevre kirliliğini en aza indirmektir (Özdemir vd., 2017).

Ortamın pasif iklimlendirme sistemi olarak tasarlanması; İnsanın iklim gereksinimlerini, iklim elemanlarını, yerel mikro iklimi ve diğer doğal – yapay mevcut fiziksel çevre verilerini kullanarak en düşük enerji gereksinimi ile yapısal bir çevre oluşturan tasarım parametrelerinin tanımıdır (Söğüt ve Karakoç, 2013).

Dünyaya bir bütün olarak bakacak olursak, ılıman iklim kuşağında yer alan ülkemiz, ılıman kuru, ılıman nemli bölgelerin yanı sıra, iklim yapıldığında sıcak ve kuru, sıcak ve nemli ve soğuk bölgelere sahiptir. Bu nedenle pasif/doğal iklimlendirme sistemlerinin ısıtma veya soğutma periyotları için stratejilere göre tasarlanması, ihtiyacın karşılanamadığı periyotlar için çeşitli tamamlayıcı iklim kontrol sistemleri ile entegre edilmesi gerekmektedir. (Töre ve Kılıçarslan, 2016).

Pasif iklimlendirme sistemlerinde yaşam çevresinin konfor şartlarını iyileştirmek için özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutan jeotermal enerji sayesinde toprağın ısını kullanarak çevremizi pasif bir şekilde iklimlendirebiliriz.

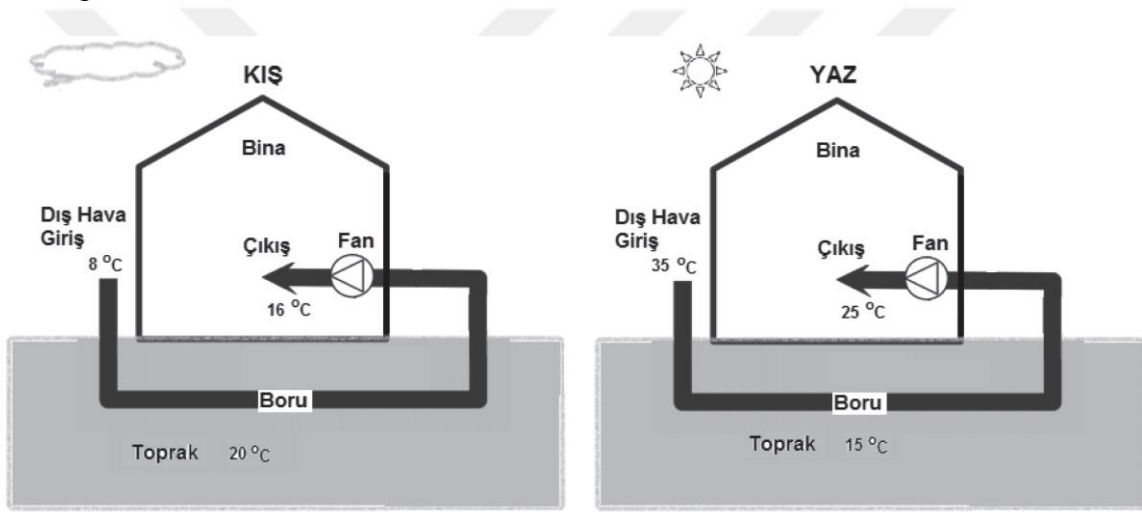
Toprak sıcaklığı yaz döneminde dış ortam sıcaklığından daha serin, kış döneminde ise daha sıcaktır. Toprağın farklı derinliklerindeki bu sıcaklıklar sayesinde sera içerisindeki yaşam çevresini yaz ya da kış dönemleri için pasif olarak soğutmak ya da ısıtmak mümkündür. Bunun için hava, toprağın içine gömülen borulardan geçirilerek kış döneminde ısıtılır, yaz döneminde ise soğutulur.

3.1. Pasif İklimlendirme Sistemleri

Isının salındığı veya alındığı rezervuarlara termal enerji rezervuarları denir. Atmosferik hava, okyanuslar, nehirler ve toprak ısı enerji depolarıdır. Toprak enerjisi çok eski zamanlardan beri bilinen bir ısı kaynağı olmuştur. Jeotermal ısı pompalarında akışkan boruları yer altına yatay ya da dikey olacak şekilde döşenir. Toprağın bir enerji kaynağı ya da iklimlendirmesi

seralar ve havalandırma sistemleri için bir model olduğu gerçeği biraz gözden kaçmaktadır (Çengel ve Boles, 2008).

Toprağın yüksek ısı kapasitesi ve çevredeki havaya kıyasla düşük sıcaklık dalgalanmaları nedeniyle, yer altı ısısı kolayca kullanılabilir. Toprak yüzeyden derinleştikçe toprağın sıcaklığı kışın artar, yazın azalır. Şekil 3.1’de yıl boyunca toprak sıcaklığındaki değişimi göstermektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere yeterli derinlikte, dış ortam sıcaklığı ile ters orantılıdır. Bu sıcaklık farkından yararlanılarak hava yazın soğutulur, kışın ise toprağa gömülü kanal veya borularla ısıtılır. THID sistemi borulardan ve havayı hareket ettiren bir fandan oluşur. THID sistemi açık ve kapalı döngüde çalışabilir. Dışarıdaki havayı alıp içeri üfleyen bir sistem açık devredir. Havayı odadan alıp ısıttıktan veya soğuttuktan sonra geri veren sistem kapalı devredir.



Şekil 3.1. Tipik bir Toprak-Hava Isı Değiştirici (THID) Sistemi

Kaynak: (Bulut vd., 2016:55)

3.1.1. Toprak Kaynaklı Pasif Isıtma Sistemi

Yerden havaya ısı eşanjörleri kullanılarak havanın ısıtılması veya soğutulması, havalandırmaya olan ısı kaybını azaltmak, sera ve binalarda termal konforu iyileştirmek için önemli bir yaklaşım olarak görülmektedir (Peretti vd., 2013:107-116). Bu nedenle, THID sistemleri hem teorik hem de deneysel olarak çeşitli uygulamalar için incelenmiştir. Türkiye’de sınırlı sayıda değerli bilim insanı ağırlıklı olarak seracılık uygulamaları konusunda çalışmıştır (Yıldız vd.,2011:3154-3160).

Teorik ve deneysel çalışmalara göre, aşağıdaki değişkenler THID sisteminin verimini ve performansını etkiler; (Abbaspour-Fard vd.,2011:499-510).

3.1.1.1. İklim Koşulları ve Coğrafi Konum

THID sistemleri, dış iklim koşullarının etkisine tabidir. THID sistemi çok sıcak çöl iklimlerinde soğutma için çok uygun olsa da ılıman ve sıcak bölgelerde ısıtma için pek uygun değildir.

3.1.1.2. Toprak Tipi

Isıl iletkenliği yüksek, yoğunluğu ve ısı kapasitesi yüksek olan topraklar THID için uygundur.

3.1.1.3. Boru Özellikleri

Beton borular suya doygun zeminlerde kullanılamaz ve su geçirmez olmalıdır. Ancak boru malzemesinin enerji depolama üzerindeki etkisi çok önemli değildir. Boru malzemesi (metal veya PVC) olabilir. Borunun uzunluğu da gücü belirler. İklim şartlarına ve istenilen performansa göre en uygun boru uzunluğu belirlenir (Tan ve Love, 2013:3734-3743). THID sistemlerinde geniş çaplı boruların kullanımı ve toprak sıcaklığının emilen ısı üzerindeki etkisi ile ilgili literatür gözden geçirilmiştir. Çok büyük çaplı boruların (900 mm'den büyük) sistem performansı üzerinde çok az etkisi olduğunu bulunmuştur (Tan ve Love, 2013:3734-3743).

3.1.1.4. Gömü Derinliği

Gömü derinliği arttıkça toprak ile hava arasındaki sıcaklık farkı artar ve dolayısıyla enerji alışverişi artar. Toprak derinliği arttıkça sistemin performansı artar. Boruların derinliği tüm sistemin verimini etkiler. Boruların 1-2 metre arası derinliğe gömülmesi yıl boyu sıcaklık ve hafriyat maliyetleri açısından uygun görülmektedir (Badescu, 2007:845-855). Ancak optimum derinliğin 3 m olduğunu söyleyenler de vardır (Ascione, 2011:2177-2188). Derinliğin THID üzerinde boru uzunluğundan daha büyük bir etkisi vardır. Ancak sistem maliyeti, gömü derinliği ve su düzenlemeleri gibi faktörler derinliği sınırlar (Özgener vd., 2013:473-480). Derinlik ve zamanın bir fonksiyonu olarak günlük toprak sıcaklığını tahmin eden bir model geliştirilmiştir (Özgener vd.,2013:473-480).

3.1.1.5. Hava Akışı

Yüksek hava akış hızları sistem performansını düşürür. Çünkü THID sisteminin enerji performansı toprak ile boru içinden geçen hava arasındaki ısı alışverişine bağlıdır. Yüksek hava hızları ısı yayılımı açısından istenmeyen bir durumdur. Yüksek hava hızı, çıkış sıcaklığını en aza indirir.

4. TOPRAK HAVA ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN TANITILMASI

Toprakta havaya ısı eşanjörleri olarak PVC (Poli Vinil Klorür), Çelik (St), Bakır (Cu) ve Alüminyum (Al) malzemeler seçilebilir (Taşdelen, 2015: 11).

4.1. Toprak Hava Isı Değiştirci Sistemi

Toprak sıcaklığındaki günlük ve yıllık değişim, dış ortam hava sıcaklığına kıyasla çok daha küçüktür ve belirli bir derinlikten sonra değişim ihmal edilebilir hale gelir ve yıl boyunca neredeyse sabit sıcaklık ile sonuçlanır. Ortam havası ile toprak arasındaki sıcaklık farkı, yazın ortam havasını gömülü borulardan geçirerek ve yer altı toprağını ısı emici olarak kullanarak soğutmak, kışın ise ortam havasını ısıtmak için kullanılabilir. THID sistemi kullanılarak dış ortam havasının yazın soğutulması kışın ise ısıtılması mümkündür. Dış ortam havası borulardan geçerken toprak ile hava arasındaki sıcaklık farkı ısı transferine neden olur. Yaz mevsiminde toprak ortam havasından daha soğuk olduğundan, hava ısını daha soğuk olan toprağa verir. Kış aylarında ise toprak sıcaklığı ortam havasından daha yüksek olduğundan hava toprak altına yerleştirilen THID sisteminden geçerken topraktan ısı çeker (Sevel, 2017).

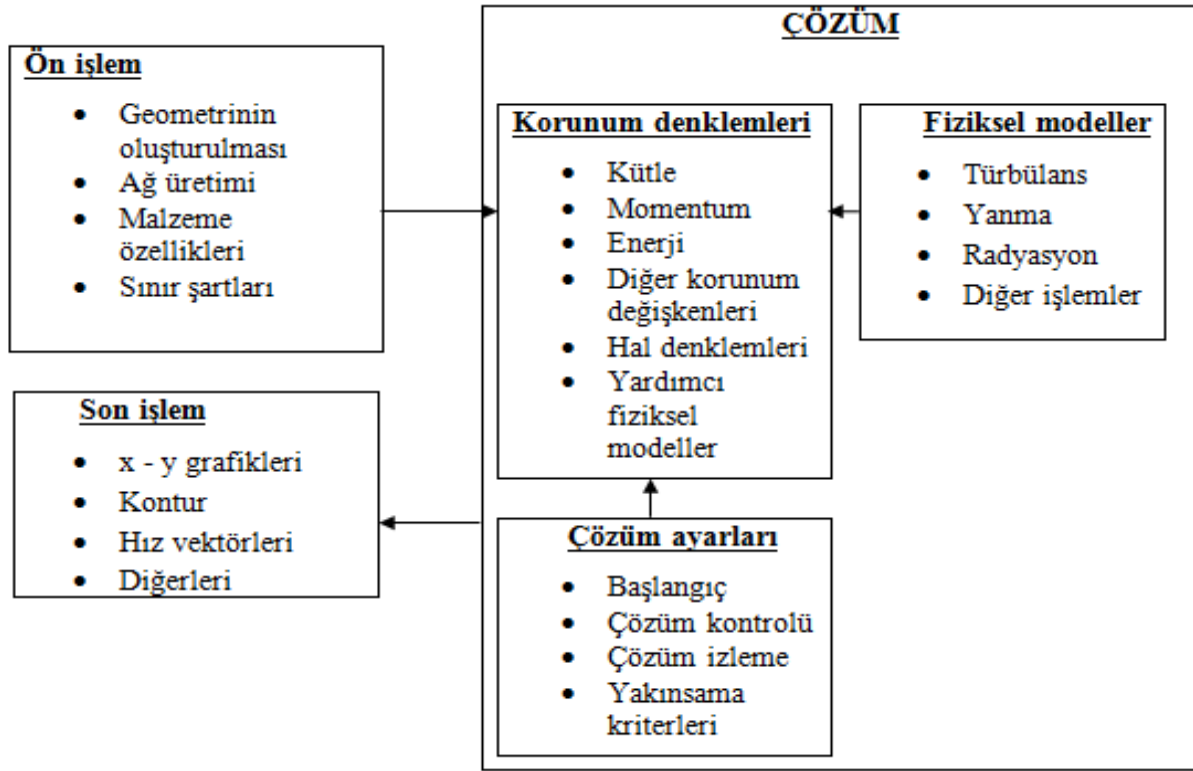
4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Hesaplamalı akışkanlar (HAD), bir akışkanın hareketini ifade eden en temel kütle, momentum ve enerji denklemlerinin bilgisayarlar yardımı ile çözülmesi işlemlerinin tanımına verilen isimdir ve numerik bir yöntemdir. HAD yöntemini kullanarak, bir sıvının hareketinin ve akışının temel fiziksel ve kimyasal ilkelerinin yanı sıra hidrodinamiği ve gerçek durumu hakkında bilgileri belirlemenin mümkün olduğu ilgili fiziksel problemin bir modelini oluşturmak mümkündür. HAD, problem geometrisinin kolaylıkla oluşturulabilmesi ve analiz edilebilmesi, deneysel çalışmalara göre zaman ve maliyet avantajı sağlaması nedeniyle ön plana çıkmaktadır (Gedik, 2012).

Isıtma, akış ve kimyasal reaksiyon problemlerini çözmek için tasarlanan HAD yazılımı üç ana adımdan oluşur;

- Ön işleme
- Çözüm
- Son işleme

Şekil 4.1’te bu kilometre taşlarında yapılan çalışmaları göstermektedir (Aksu, 2011).



Şekil 4.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin temel aşamaları

Kaynak: (Tu vd., 2008)

4.3. Toprak Hava Isı Değiştirici Çözümlemesi

Karmaşık ve üç boyutlu çoğu akış problemlerindeki türbülans etkilerinden dolayı denklemlerin ilgili sınır koşulları ile analitik olarak çözülmesi mümkün değildir. Bu nedenle denklemlerin çözülmesi için çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler için yapılan araştırmalar ve edinilen tecrübeler sonucunda, sonlu hacimler yöntemi ile kolay ve hassas çözümlerin elde edilebileceği gösterilmiştir (Koç vd., 2021). Sonlu hacim yönteminde, ilgili bölgeler sonlu sayıda örtüşmeyen kontrol hacimlerine bölünmelidir. Diğer yöntemlerden farklı olacak biçimde sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan hesaplamalar düğümler üzerinde yapılmadığından dolayı esnek olan kararlı ağlara uygulanmaktadır. Bahsi geçen bu avantajından dolayı hem yapılandırılmamış karar ağlarında hem de yapılandırılmış karar ağlarında başarılı sonuçlar vermektedir (Koç vd., 2021).

Topraktan havaya geçen ısı miktarı (kış durumu), havadan toprağa geçen ısı miktarı (yaz durumu), toprak sıcaklığı ve THID sistemi ile ilgili diğer teorik hesaplamalar için temel ısı transferi denklemleri kullanılır (Sevel, 2017).

5. YÖNETİCİ DENKLEMLER VE TÜRBÜLANS MODELİ

5.1. Süreklilik ve Navier – Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemi ve süreklilik denklemi, tüm akışlara uygulanabilen en önemli hareket akış denklemleridir. Süreklilik denklemi, diferansiyel ölçümde bir kontrol hacminden geçen bir sıvının kütesinin korunumu yasasını ifade ederken, Navier-Stokes denklemleri, Newton'un ikinci yasasını bir kontrol hacmine uygulayan momentumun veya momentumun korunumu denklemleridir. Kartezyen koordinatlarda sabit fiziksel özelliklere sahip Newton tipi sıkıştırılamaz akış için süreklilik ve hareket denklemleri sürekli rejim kabulüne göre elde edilmiş denklemlerdir. Dolayısıyla, Newton tipi, sıkıştırılamaz ve sürekli rejimdeki akış için denklemler şu şekilde yazılır (Düz, 2013:35).

5.2. Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

5.3. Navier Stokes Denklemleri

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \tau_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial z^2} \right) \quad (5.2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau_{yy}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau_{yz}}{\partial z^2} \right) \quad (5.3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau_{yz}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau_{zz}}{\partial z^2} \right) \quad (5.4)$$

Burada u, v ve w sırasıyla x, y ve z yönlerindeki hız bileşenleridir. Tüm bu denklemler birlikte tanımlanmış denklemler olarak adlandırılır. Tüm akış problemleri bu denklem sistemi kullanılarak çözülür (Düz, 2013:36). Toprak hava ısı değiştiricisinin termal analizi ANSYS Workbench 18.1. Fluent yazılımında üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Hız bileşenleri u, v ve w, Navier-Stokes denklem sisteminde değişkendir. Havanın diğer fiziksel özellikleri olan ρ , p sabit değildir. Sıcaklık farkı sebebiyle ideal gaz denkleminde yoğunluk değişir. Böylece de zaten doğal taşınım gerçekleşir. Ayrıca, havanın yoğunluğu ve basıncı sırasıyla ρ ve p ile temsil edilir. Ayrıca, τ_{ij} , Reynolds gerilmeleridir ve ν , havanın kinematik viskozitesidir.

5.4. Enerji Denklemi

Türbülanslı akışta sıkıştırılamaz akış için kartezyen koordinatlarda kullanılan enerji denklemi aşağıda Denklem 5.5.a'da verilmiştir. Burada T sıcaklığı temsil eder. Isıl yayılım katsayısı (α) ile dinamik viskozite ve viskoz dağılım fonksiyonu sırasıyla μ ve ϕ ile temsil edilir.

$$\left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \phi \quad (5.5.a)$$

$$\phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (5.5.b)$$

5.5. Türbülans Modeli

Türbülans, bir sıvı veya gazın hareketindeki kaotik çalkantılardır. Türbülanssız akış türüne laminar akış denilmektedir. Bir akışın laminar olup olmamasını Reynolds sayısı belirlemektedir. Türbülans, birçok bilim adamının ele aldığı ancak analitik bir çözümü bulunamayan sorunlardan biridir (Doğan, 2014:36-38).

Yüksek Reynolds sayılarında, türbülanslı akışta akış ataleti viskoz kuvvetlerden daha baskın hale gelir. Sonuç olarak, sıvı hareketi kararsız hale gelir. Akışın hızı ve diğer tüm özellikleri rastgele ve kaotik bir şekilde değişmeye başlar ve akış üç boyutlu hale gelir. Türbülans probleminin çözümü doğası kadar karmaşıktır, bu nedenle türbülans problemini çözmek için çeşitli türbülans modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen türbülans modelleri akışı tam olarak tanımlayamamaktadır. Her akış simülasyonu için tek bir türbülans modeli yoktur. Farklı özelliklere sahip akışları modellemek için çeşitli türbülans modelleri kullanılabilir (Mehdiyev, 2009:17).

k- ω modeli karmaşık akışlarda yakınsama güvenilirliği, hesaplama maliyeti ve doğruluk açısından iyi bir seçimdir. Bu modeller genellikle karmaşık akışlar da dahil olmak üzere ısı transferli veya transfersiz endüstriyel uygulamalar için uygundur. k- ω modelinde, iki taşıma denklemi, k- ϵ modeline benzer şekilde, ancak bu, ikinci türbülans değişkeninin seçimi değiştirilerek çözülür. Bu modeller, k- ϵ ve k- ω , genellikle HAD modellemesinde kullanılır (Doğan, 2014:36-38).

5.6. SST k- ω (Omega) Modeli

Bu çalışmada SST k- ω (Omega) modeli laminar ve türbülanslı geçiş bölgelerinin birlikte bulunması nedeniyle kullanılmıştır. Serbest akışlarda k — ϵ (Epsilon) modeli ile

yapılan çözümlerin, rastgele seçilmiş sınır değerlerinden bağımsız olduğunu ancak, sınır duvar bölgelerinde ters basınç değişimlerinin yaşandığı sınır katmanlarında yeterli performansı sergileyemediğini belirtmiştir. Burada türbülans kinetik enerjisi (k), yayılma hızı (ε), türbülans frekansı (ω) ile gösterilir (Versteeg vd., 2007:91).

Bu doğrultuda duvara yakın bölgelerde $k - \omega$ modelinin kullanıldığı ve tamamen türbülanslı iç bölgelerde $k - \varepsilon$ modelinin kullanıldığı hibrit bir model kullanılmasını önermiştir. Modelde k taşınım denklemi $k - \omega$ modelinde kullanılan ile aynıdır. Ancak, ω taşınım denklemi $\varepsilon = k\omega$ dönüşümü kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho\omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \text{grad } \omega \right] + \gamma_2 (2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j}) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (5.6)$$

Yukarıdaki denklemde orijinal $k - \omega$ modeline kıyasla son terim ilave edilmiştir. Bu terim ε denkleminin ω 'ya dönüşümü neticesinde ortaya çıkmaktadır. Model sabitleri ise aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_k = 1,00 \quad \sigma_{\omega,1} = 2,00 \quad \sigma_{\omega,2} = 1,17 \quad \gamma_2 = 0,4 \quad \beta_2 = 0,083 \quad \beta^* = 0,09$$

$k - \varepsilon$ modelinden $k - \omega$ modeline geçiş sebebiyle numerik uyumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Bunun üstesinden gelmek için karışım fonksiyonu kullanılmaktadır. Ayrıca ters basınç altındaki ve cisim arkasında kalan (wake) akışlardan daha iyi sonuçlar alabilmek için türbülans viskozitesi sınırlandırılmış ve akış durgunluk bölgelerinde aşırı türbülans artışı engellemek için de türbülans kinetik enerji üretimi sınırlandırılmıştır (Karaman, 2018:50).

5.7. Reynolds Sayısı

Katmanlardan türbülanslı akışa geçiş, diğer parametrelerin yanı sıra yüzey geometrisine, yüzey pürüzlülüğüne, serbest akış hızına, yüzey sıcaklığına ve sıvı tipine bağlıdır. 1880'lerdeki kapsamlı deneylerden sonra Reynolds, akış rejiminin öncelikle sıvıdaki viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine oranına bağlı olduğunu keşfetmiştir. Boyutsuz bir nicelik olan bu orana Reynolds sayısı denir (Çengel, 2011). Yuvarlak bir borudaki akış için Reynolds sayısı şu şekilde ifade edilir;

$$\text{Reynold Sayısı} = \frac{\rho V_{ort} D}{\mu} = \frac{V_{ort} D}{\nu} \quad (5.7)$$

V_{ort} : Akışkanın ortalama hızı (m/s)

$Re < 2300$ Laminer akış tipi

D : Akışkanın geçtiği borunun çapı (m)

$2300 < Re < 4000$ Geçiş bölgesi

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s)

$Re > 4000$ Türbülanslı akış tipi

ν : Akışkanın kinematik viskozitesi (m²/s)

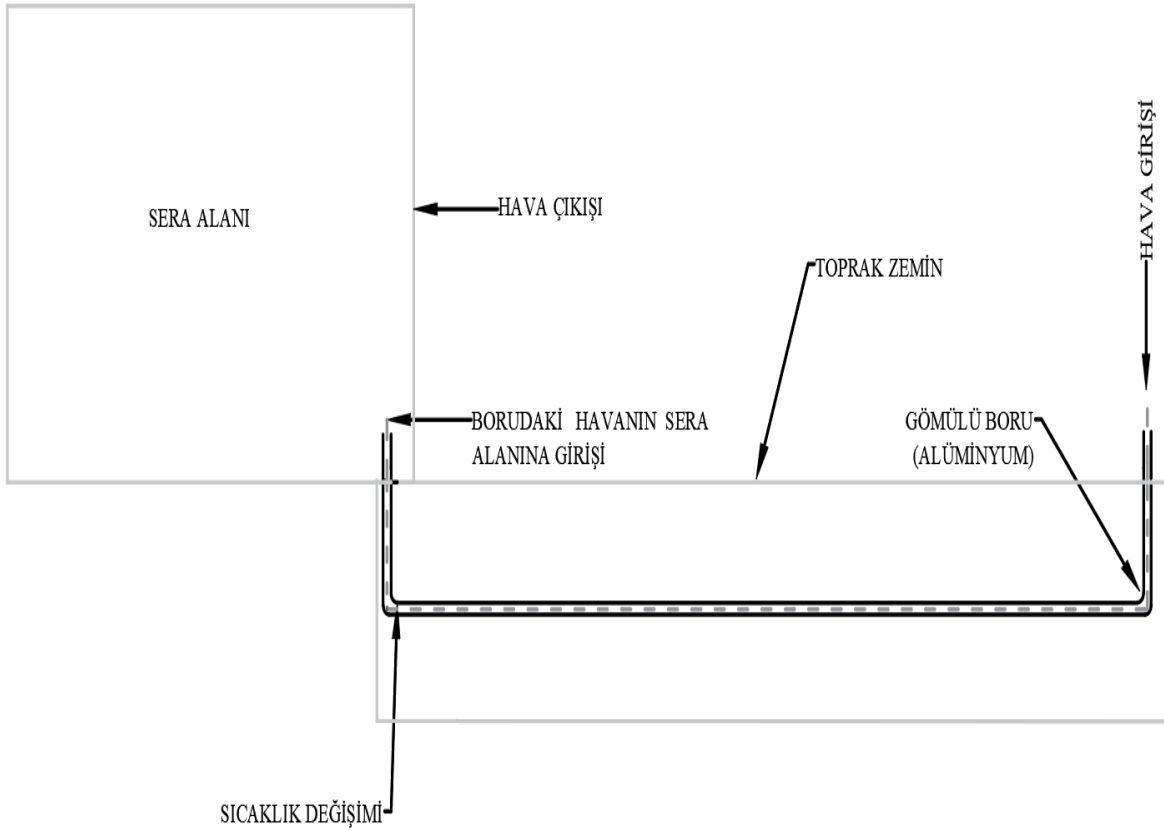
ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m³)



6. BORU VE SERANIN TASARLANMASI

6.1. Toprak Hava Isı Değiştirici (THID) Sisteminin Seraya Entegre Hali

Eskişehir İklim koşullarında tipik bir seranın ısıtılması için kullanılan şekil 6.1’de iki boyutlu şematik çizimi verilen THID sistemi kullanılmıştır. Yere gömülü borunun toprak derinliği 3 metre ve buradaki toprak sıcaklığı 19°C’dir (Bansal, 2012:102-108). Sayısal analizler ANSYS Workbench 18.1. Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Dış ortam sıcaklığı kış mevsimi düşünülerek 0°C olarak alınmıştır. Bu değer (TÜİK veri istasyonu Meteoroloji Genel Müdürlüğü) web sayfasından alınmıştır. Boru malzemesi olarak ısıl iletkenliği yüksek olan alüminyum seçilmiştir.

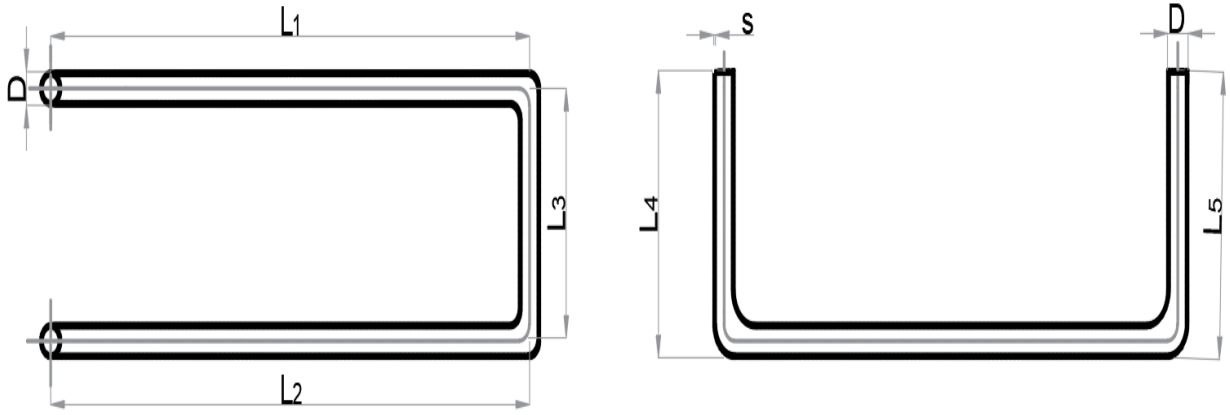


Şekil 6.1. THID modelinin seraya entegreli şematik çizimi

6.2. Toprak Hava Isı Değiştiricisinin (THID) Geometrisi

Toprak hava ısı değiştiricisinin şematik iki boyutlu görünüşü şekil 6.2’de gösterilmiştir.

Borunun Şematik Görünüşleri



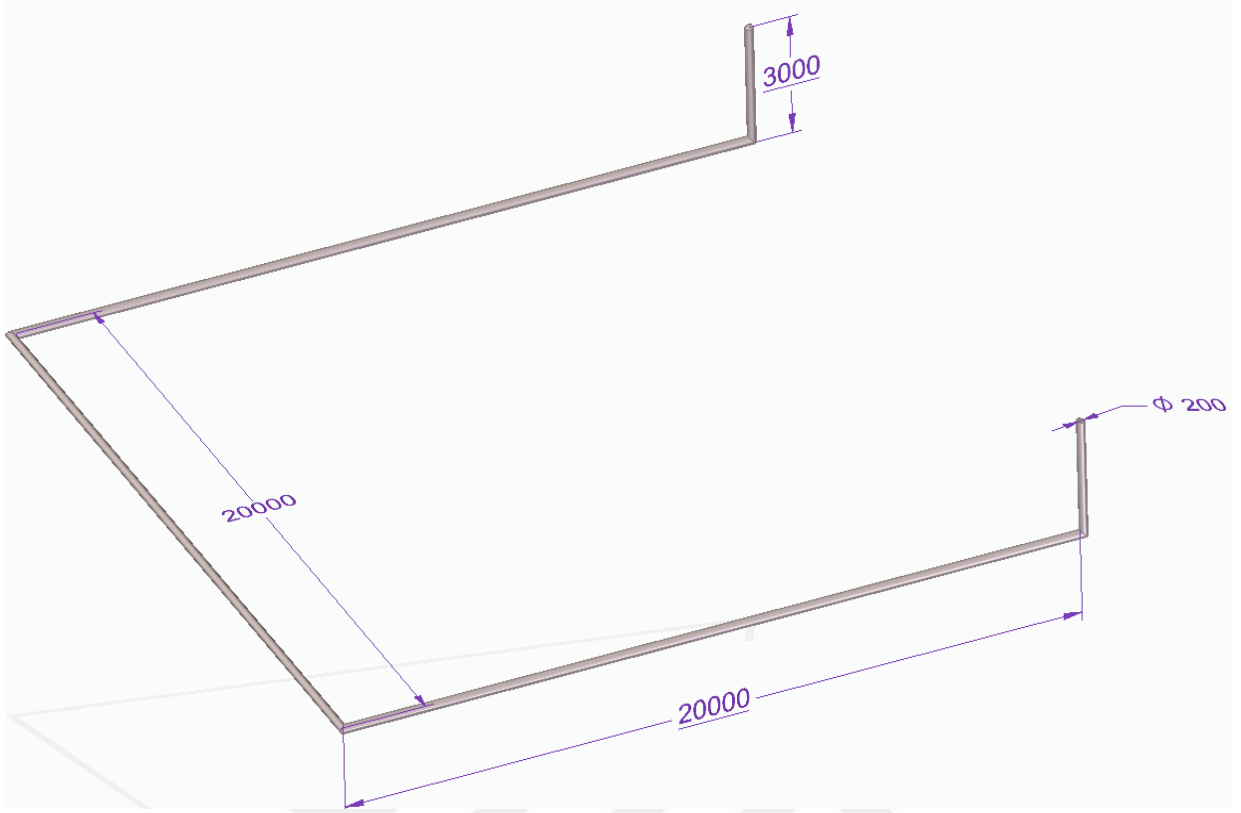
$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 = \text{Toplam Boru Boyu Uzunluğu}$$

D = Çap

S = Et Kalınlığı

Şekil 6.2. Borunun şematik iki boyutlu görünüşü

Solid Edge ST9 programında oluşturulan borunun çapı 0,2 m, boru uzunluğu 66 m olan alüminyum borunun katı modeli şekil 6.3’ de gösterilmiştir. Alüminyum boru malzemesi, yüksek ısıl iletkenlik katsayısı nedeniyle seçilmiştir. Alüminyum borunun et kalınlığı 2 mm’dir. Alüminyum borunun ölçüleri (Konya Seydişehir Alüminyum) web sayfasından alınmıştır.

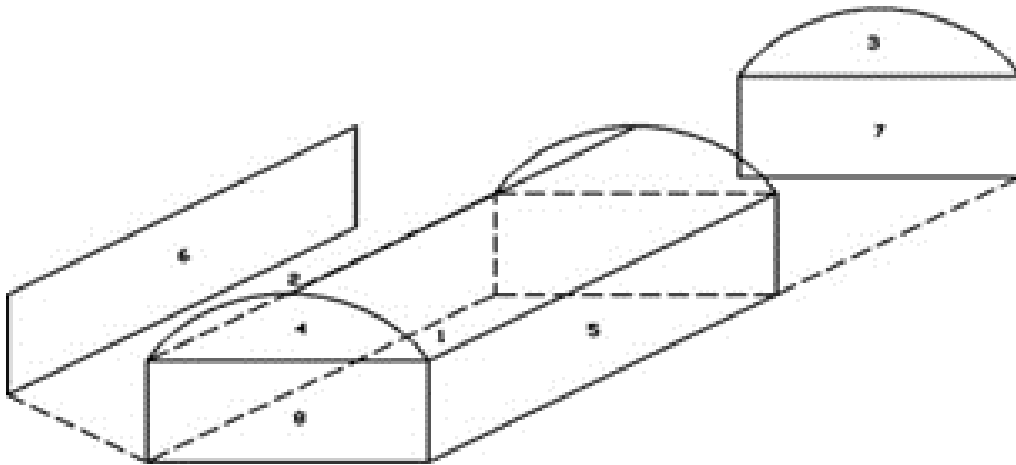


Şekil 6.3. THID sisteminde kullanılacak olan $\varnothing=200$ mm alüminyum borunun geometrisi (ölçüler mm cinsindendir.)

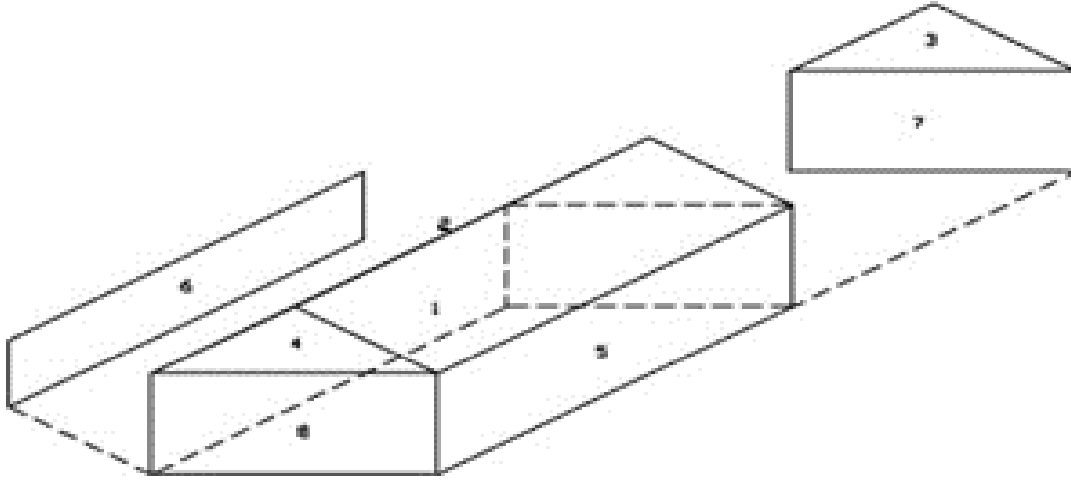
6.3. Sera Çadır Tipinin Seçilmesi

6.3.1. Sera Çadır Tipleri

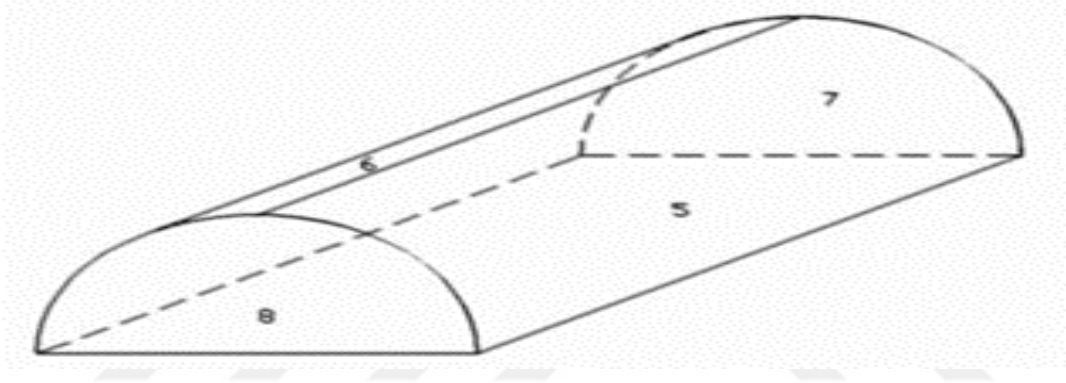
Şekil 6.4’de çalışma kapsamında ele alınan farklı yapıya sahip seralar verilmiştir. Çalışmada, sera tipi olarak yay çatılı sera (A tipi, Şekil 1(a)), beşik çatılı sera (B tipi, Şekil 1(b)) ve yüksek tünel sera (C tipi, Şekil 1(c)) seçilmiştir (Hürdoğan vd., 2018:56).



(a) Yay çatılı sera (A tipi)



(b) beşik çatılı sera (B tipi)



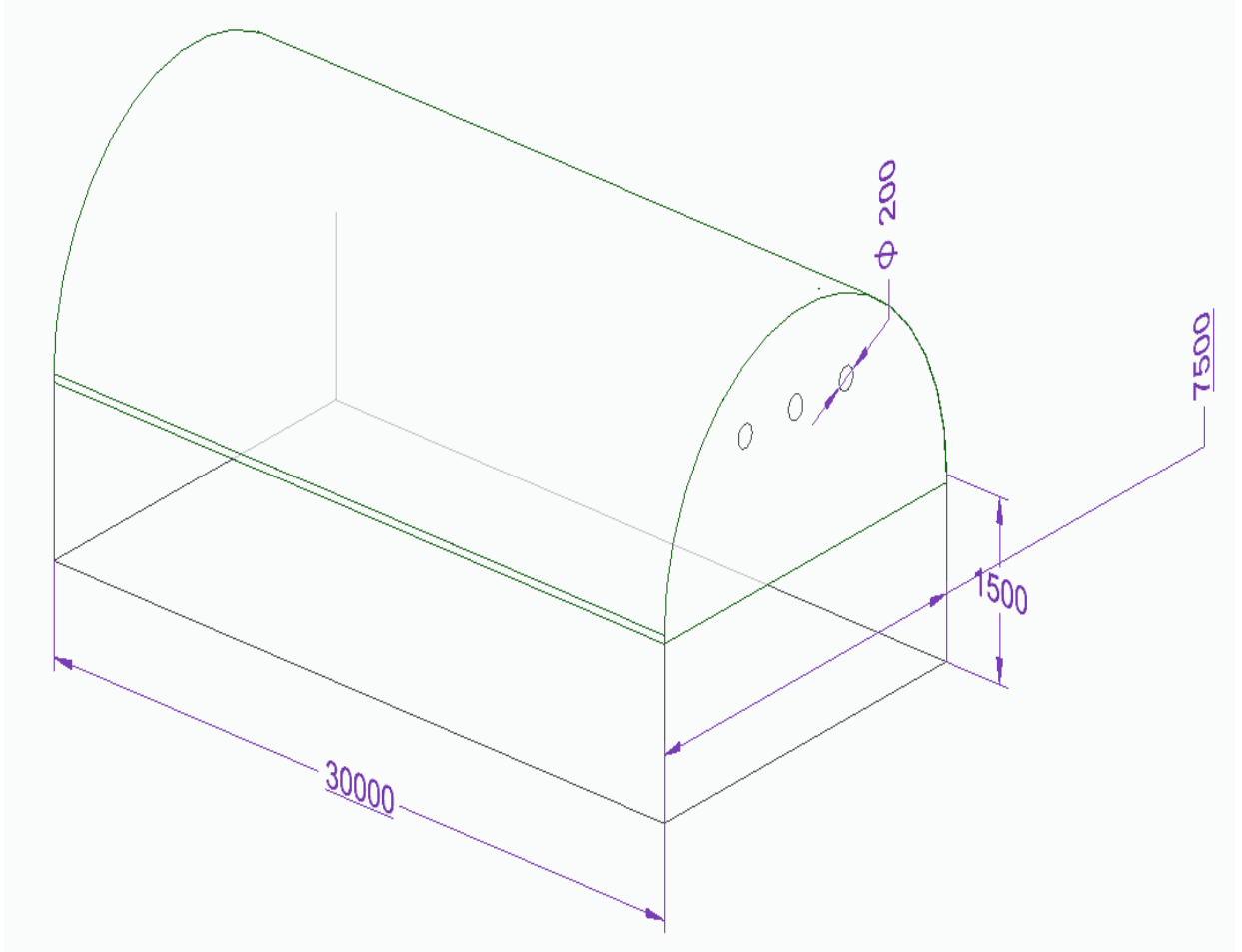
(c) yüksek tünel tip sera (C tipi)

Şekil 6.4. Ele alınan sera tipleri; (a) yay çatılı sera (A tipi), (b)beşik çatılı sera (B tipi), (c) yüksek tünel tip sera (C tipi)

Kaynak:(Hürdoğan vd., 2018:56)

6.4. Çadır Tipi

Eskişehir yöresine ait meteorolojik veriler doğrultusunda sonbahar ve kış ayları sıcaklık değerleri baz alındığında C tipi (Çadır kapalı tip) yüksek tünel tip seranın daha uygun olduğu tespiti yapılmıştır. Sera çadırımızın görüntüsü şekil 6.5’de verilmiştir. Boyu 30 metre, eni 7,5 metre, duvar yüksekliği 1,5 metre ve hava çıkış delikleri 0,2 metre olan tipik bir sera ölçü geometrisi bu çalışma kapsamında ele alınmıştır (Kim vd., 2021:1-11).

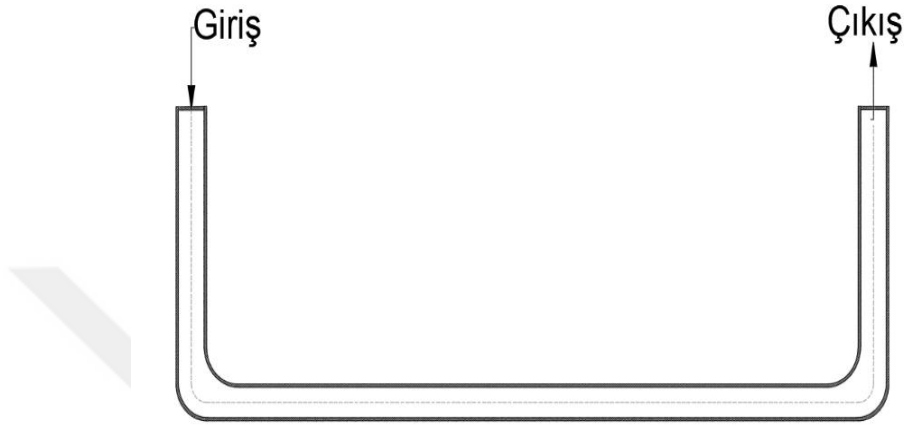


Şekil 6.5. THID sisteminde kullanılacak olan seranın ölçüleri (ölçüler mm cinsindendir.)

7. SAYISAL ÇÖZÜMLEME

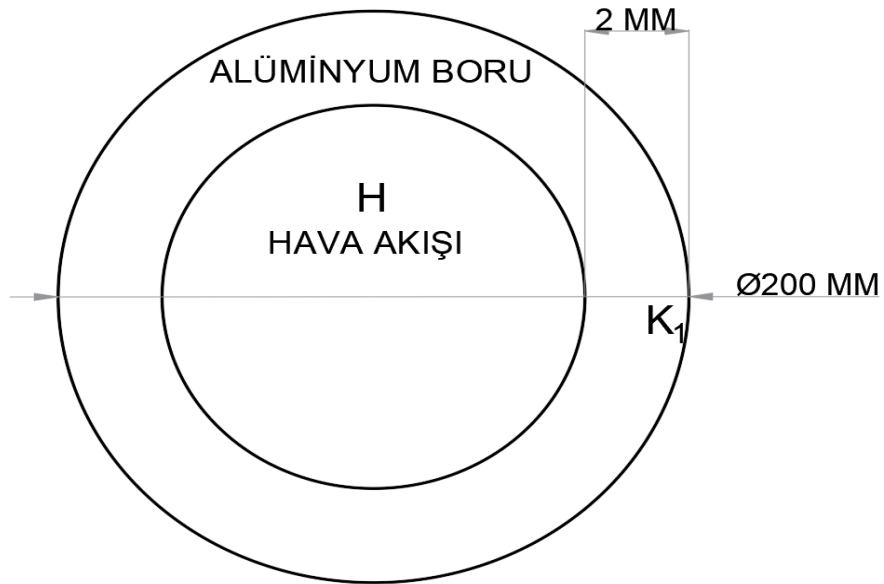
7.1. Sınır Koşulları

Dışarıdan alınan temiz hava THID sistemine atmosferik basınçta 0°C de girmektedir. Gömülü borunun toprak derinliği (h=3) metredir. Aşağıdaki şekil 7.1’de borunun giriş ve çıkış bölgelerini göstermektedir.

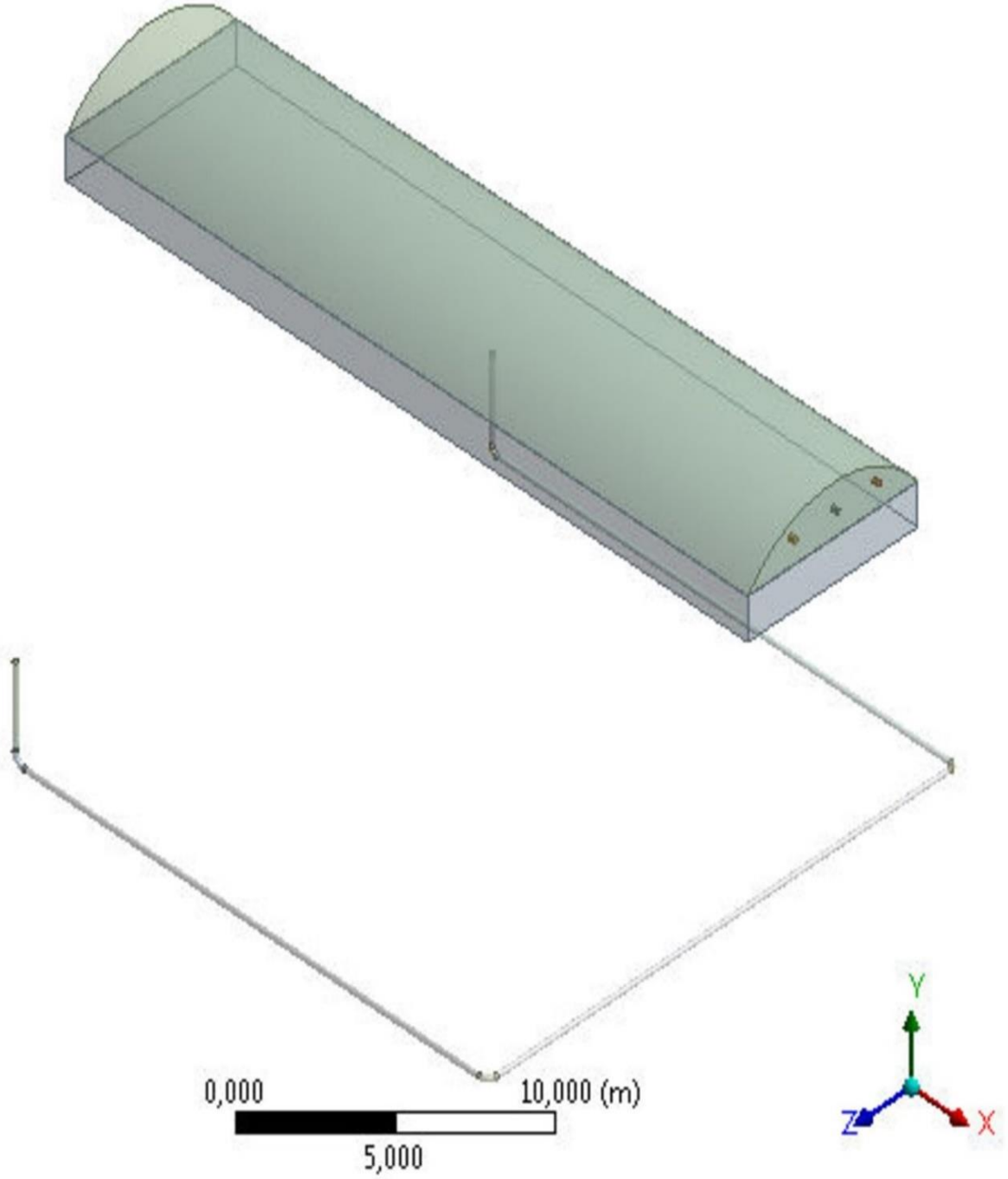


Şekil 7.1. Borunun giriş ve çıkış yerleri

Alüminyum borunun ısı iletim katsayısı $K_1 = 202,4 \text{ W/mK}$ 'dir. Borunun dış cidar sıcaklığı 19°C'dir. Boru et kalınlığı 2 mm olup, içerisinde iletimle ısı transferi vardır. Borunun içindeki hava ile iç cidar arasında da taşınım ile ısı transferi vardır. Doğal ısı taşınım katsayısı $H = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir. Boru çapı 200 mm'dir. Bu bilgiler şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Boruda oluşan ısı iletim ve taşınım bölgeleri



Şekil 7.4. Seraya entegreli THID sisteminin üç boyutlu görünümü

7.3. THID Sistemi Akış Tipi

$$Re = \frac{pV_{ort}D}{\mu} = \frac{V_{ort}D}{\nu}$$

V_{ort} : Havanın ortalama hızı: 0,33 (m/s)

D : Havanın geçtiği borunun çapı: 0,2 (m)

μ : Havanın dinamik viskozitesi: 10^{-5} (Pa.s)

ρ : Havanın yoğunluğu 1,2 (kg/m³)

$Re = (0,33) \times (0,2) \times (1,2) / (10^{-5}) = 7920$ sistemimizde akış türbülanslı akıştır.

$Re > 4000$ Türbülanslı akış tipidir.

Sonlu hacimler yöntemi kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal bir yöntemdir. Sonlu hacimler metodu akışkanlar mekaniğinde, akışkanın hareket denklemlerinin integral hallerini fiziksel uzayda ayrıklaştırarak çözmek için kullanılır. Çözüm için, incelenecek bölgenin üst üste binmeyen sonlu sayıda kontrol hacmine bölünmesi gerekmektedir. Bu sonlu sayıdaki elemanların tamamı çözüm ağı veya sayısal ağ olarak adlandırılmaktadır. Genellikle değişkenler kontrol hacimlerinin merkezinde hesaplanır. Diğer metotlardan farklı olarak, sonlu hacimler yöntemi ile hesaplamalar düğüm noktalarında yapılmadığından çok esnek çözüm ağlarına uygulanabilmektedir. Bu avantajı dolayısıyla, yapısal çözüm ağlarında olduğu kadar yapısal olmayan çözüm ağlarında da başarılı sonuçlar vermektedir. Karmaşık geometrilere uygulanabilmesi ve daha esnek olması açısından daha çok yapısal olmayan çözüm ağları tercih edilmektedir (Mehdiyev, 2009:16).

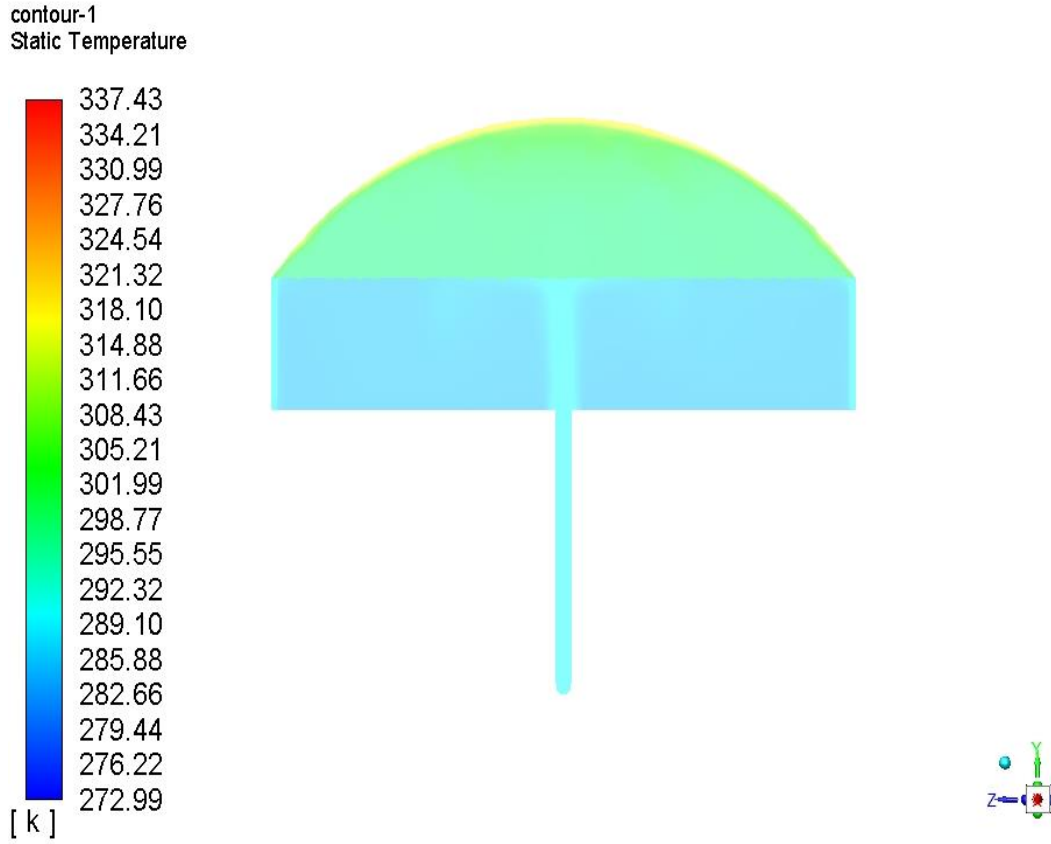
Yönetici denklemler sayesinde Ansys Workbench'in ağ oluşturması sonlu hacim yöntemi aracılığıyla yapılmıştır. Titiz bir ağ bağımsızlık testi sürecinden sonra 1,529,802 nokta sayısı ve 1,390,000 eleman sayısı elde edilmiştir.

Türbülanslı simüle etmek için Kayma Gerilmesi Taşınması (SST) $k-\omega$ (Omega) modeli kullanılmıştır. Enerji denklemi aktifleştirilmiştir. Bu model, literatürde bu yaklaşımın düşük hızlı türbülanslı akışları, yani geçiş akışlarını modellemek için uygun olduğunu doğruladığından tercih edilmiştir (Özkan, ve Erkan, 2022:421-429- Thundil vd.,2012:1165-1174). Ayrıca, ω (Omega) dağılma hızı için taşıma denklemini içeren türbülans modellerinin, burada incelenen boru akışı gibi iç akışlar için nispeten uygun olduğu da bilinmektedir.

8. SAYISAL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

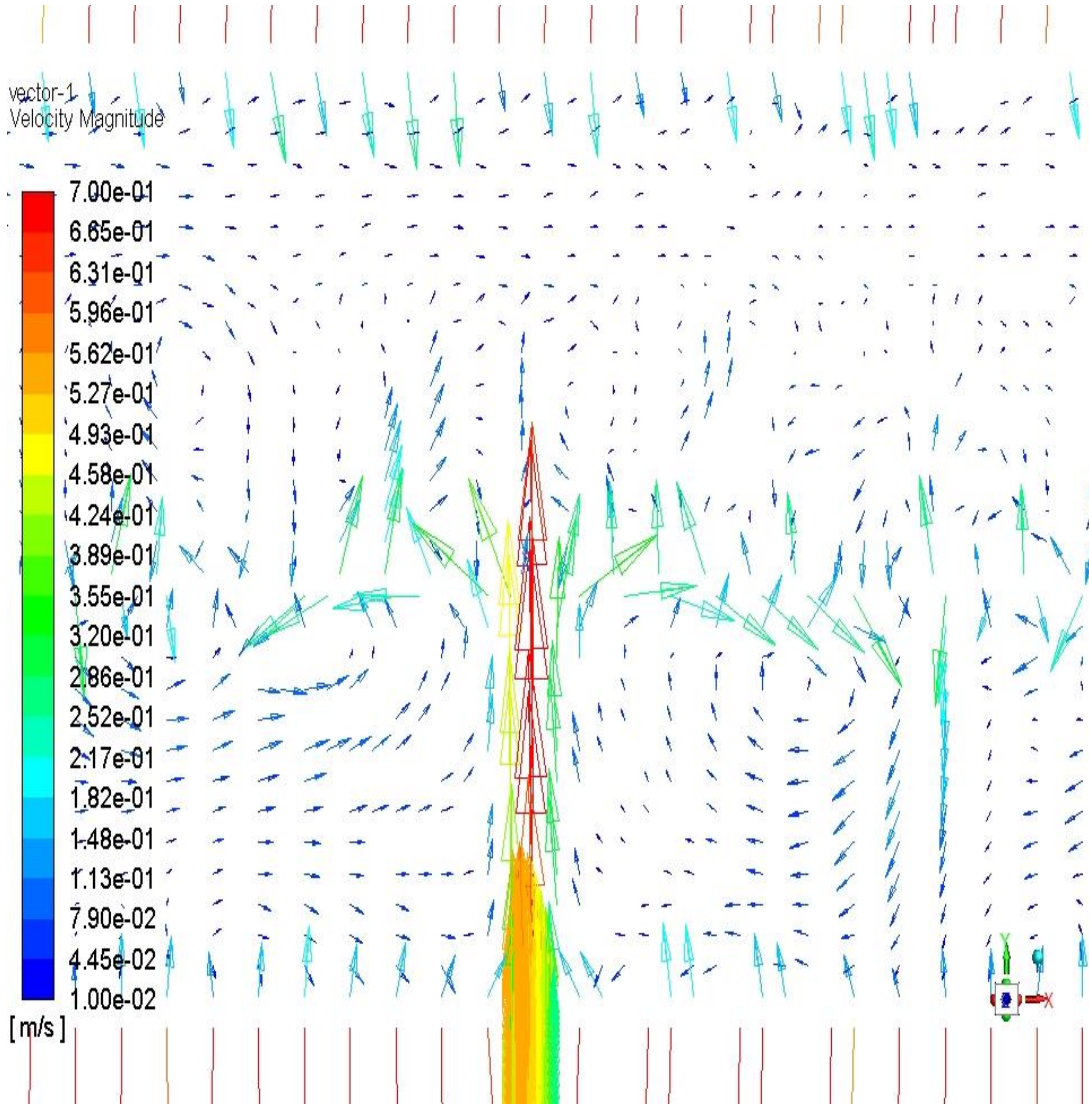
8.1. Sonuçların İncelenmesi

Bu çalışmada incelenen dış ortam sıcaklığı 273 K'dir. Sera iç ortam havasının en yüksek sıcaklık değeri yaklaşık 337 K'dir. Sera içerisindeki ortalama sıcaklık değeri ise 292 K'dir. Sonuçlar şekil 8.1' de gösterilmektedir. Bu sonuç serada bitki yetiştirmek için uygun kabul edilebilir. Toprak hava ısı değiştirici sistemine bağlı doğal taşınımlı ek ısıtma sağlanmıştır.



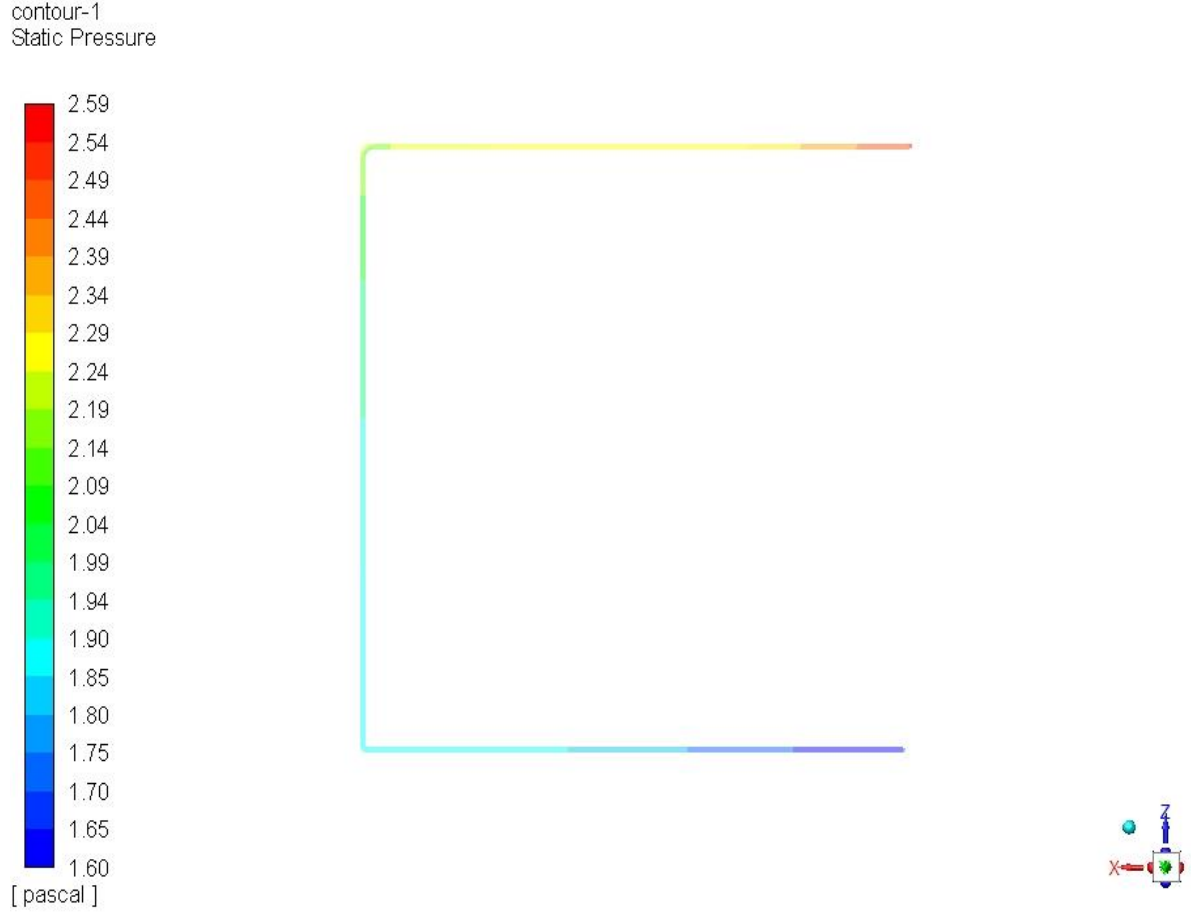
Şekil 8.1. Sera iç kesit sıcaklık konturu

Şekil 8.2.'de seraya giriş bölgesindeki hızın vektörel dağılımı görülmektedir.



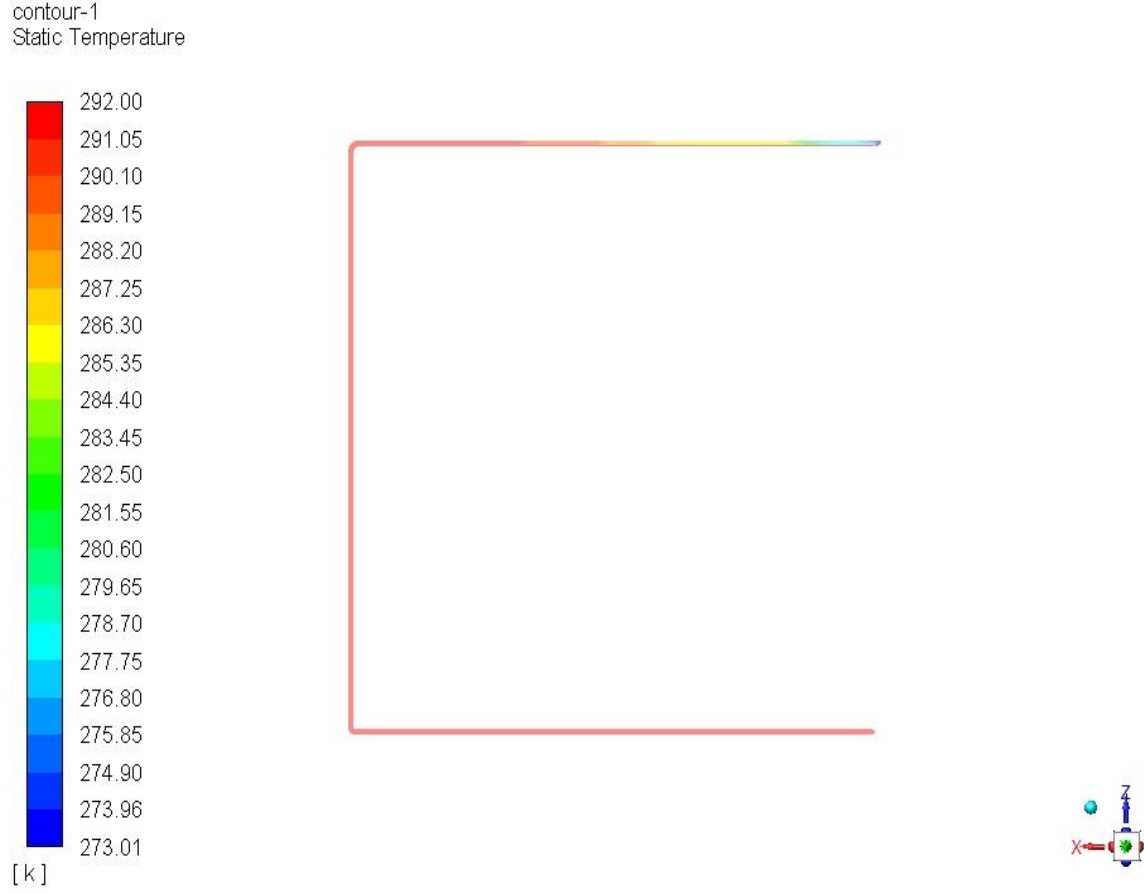
Şekil 8.2. Seraya giriş hız vektörleri konturu

Yatay boruların iç kesitindeki basınç dağılımı şekil 8.3’ de gösterilmiştir. Burada 2,59 Pa boruya giriş yapan kısımdaki hava basıncını göstermektedir. Boru çıkışa yakın kısımda ise hava basıncı 1,6 Pa statik basınç seviyesine ulaşmıştır. Bu sonuçlar ek pompaya gereksinim duyulmadığını ortaya koymuştur.



Şekil 8.3. Yatay boruların kesit basınç konturu

Isı eşanjörlerinde boru uzunluğu arttıkça basınç düşüşü artmaktadır. Öte yandan, boru uzunluğunun artması akışkana aktarılan toplam ısıyı yükseltmekte ve dolayısıyla daha yüksek sıcaklık farkları elde edilebilir. Yatay boruların iç kesitindeki sıcaklık dağılımı şekil 8.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 8.4. Yatay boruların kesit sıcaklığı konturu

9. MALİYET ANALİZİ

9.1. İhtiyaç Duyulan Enerjinin Hesaplanması

Isı Miktarı Formülü: $Q = (\dot{m} \cdot c \cdot \Delta t)$ (9.1)

Q : Isı miktarı (Watt)

$\dot{m}$: Kütleli debi (kg/s) = (Hız x Alan x Havanın Yoğunluğu) = $(0,33) \times (0,03) \times (1,18)$
= 0,0117 (kg/s)

c : Havanın özgül ısısı (J/kg.K) = 1007 (J/kg.K)

ΔT : Sıcaklık farkı (K) = $(19-0) = 19$ K (Analiz sonucu bulunan sıcaklık 19 K'dir.)

$Q = (0,0117 \times 1007 \times 19) = 223,85$ Watt toprak hava ısı değiştiricisinden gelen ısı kazançtır.

$223,85/1000 = 0,22385$ kw'lık bir güç elde edilmiştir. Isı eşanjörü gündüz vakitleri çalışacaktır. Günde 8 saat ayda 240 saat çalışacaktır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) web sayfasından alınan fiyat tarifesine göre saat başına 2023 yılı elektrik tüketim bedeli 2,6 TL/kwh saat olarak belirlenmiştir.

$(2,6) \times (8) \times (30) \times (0,22385) = 139,68$ TL bir aylık elektrik fiyatıdır.

2023 yılı toprak hava ısı değiştiricisi maliyeti (Konya Seydişehir Alüminyum) web sayfasından alınan bilgiye göre $\varnothing = 200$ mm, et kalınlığı 2 mm ve uzunluğu 66 m olan borunun kg fiyatı 35 TL'dir. Borunun toplam ağırlığı 72,33 kg'dır.

$(72,33) \times (35) = 2531,55$ TL boru fiyatı / 139,68 TL elektrik fiyatı = 18 ay/TL'dir. Hesaplamalar göstermiştir ki böyle bir sistem kendi maliyetini 18 ay da telafi edebilmektedir.

10. SONUÇ

Bu çalışmada THID sistemi içindeki üç boyutlu akış sayısal olarak incelenmiştir. Bu akış konfigürasyonu, bir sera ortamını pasif olarak ısıtmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu sistem bitkinin donmama sıcaklığına göre planlanmış ve bu nedenle Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan ortalama sıcaklık sonucunda boruya girecek olan ortam hava sıcaklığı 0°C seçilmiştir. Taze ve soğuk hava, yerin 3 m altına gömülü olan ısı eşanjör sistemine çekilir. Bu seviyedeki zemin sıcaklığı mevsimlerden bağımsız olarak sabittir. Sera içerisindeki ortalama sıcaklık 19°C'dir. Bu sıcaklık, önerilen sistem için bir ısı kaynağı olarak kullanılmış ve sera içine çekilen taze hava, genellikle serada yetişen bitkiler için uygun olduğu düşünülen bu sıcaklığa kadar ısıtılabilir. Isınan havanın borudan seraya giriş hızı 0,33 m/s, sıcaklığı ise 18,9°C'dir. Seradan dışarıya çıkan havanın hızı 0,12 m/s, sıcaklığı ise 9°C'dir. Sera içine girişteki hacimsel debi 0,0099 m³/s, sera hacmi ise 624 m³'tür. Ayrıca sera güneş ışınlı kaynağı ısınmıştır. Sera tavanında ışınlı sayesinde 2735 Watt'lık ısı kazanç elde edilmiştir. Sera yan duvarlarında ise ışınlı sayesinde 749 Watt'lık ısı kazanç sağlanmıştır. Toprak hava ısı değiştiricisi kaynağı 232 Watt'lık ısı kazanç sağlanmıştır.

Bu bilgiler entegre bir ısı eşanjörü ve sera tasarlamak isteyen kullanıcı tarafından kullanılabilir. Böyle bir sistem ek pompalama maliyetlerini azaltmıştır. Mevcut hesaplama sonuçları, böyle bir sistemin söz konusu coğrafi bölgede kışın seraların ısıtma maliyetlerini azaltmak için uygulanabileceğini ortaya koymuştur. Bu tür bir sistemdeki en yüksek basınç farkı yaklaşık 2,5 Pa olduğundan önemli bir ek pompalama maliyeti yoktur. Bu küçük basınç farkı da sistemi doğal konveksiyon süreci tarafından çalıştırılabileceğini destekler. Sera içindeki tüm havanın değişmesi için geçen süre 17 saat olarak bulunmuştur. Ayrıca maliyet analizi sonucu sistemin amortisman süresi 18 ay olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak sistem, çalışması için ek enerjiye ihtiyaç duymayan pasif sistem olarak kabul edilebilir.

KAYNAKÇA

- Abbaspour-Fard, M. H., Gholami, A., & Khojastehpour M.** (2011). *Evaluation Of An Earth-To-Air Heat Exchanger For The North-East Of Iran With Semi-Arid Climate*, International Journal Of Green Energy, 8:4, 499-510.
- Aksu, E.** (2011). *Gemi direncinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle hesaplanması*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi
- Al-Ajmi, F., Loveday, D. L., & Hanby, V. I.** (2006). *The cooling potential of earth–air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate*. Building and Environment, 41(3), 235-244.
- Ascione, F., Bellia, L., & Minichiello, F.** (2011). *EarthTo-Air Heat Exchangers For Italian Climates*, Renewable Energy, 36, 2177-2188.
- Aytaç, O.** (2021). *Dünyada ve Türkiye’de Enerjinin Görünümü 2021*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Enerji Çalışma Grubu.
- Badescu, V.** (2007). *Simple And Accurate Model For The Ground Heat Exchanger Of A Passive House*, Renewable Energy, 32, 845-855.
- Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J.** (2012). *Performance evaluation and economic analysis of integrated earth–air–tunnel heat exchanger–evaporative cooling system*. Energy and Buildings, 55, 102-108.
- Bulut, H., Karadağ, R., Demirtaş, Y., & Hilali, İ.** (2016). *Şanlıurfa Kış Şartlarında Bir Toprak-Hava Isı Değiştiricisinin Performans Analizi*, Tesisat Mühendisliği Sayı 152, 54-66.
- Chiesa, G., Simonetti, M., & Grosso M.** (2014). *A3-Field Earth-Heat-Exchange System For A School Building In Imola, Italy: Monitoring Results*, Renewable Energy, 62, 563-570.
- Çengel, Y. A.** (2011). *Isı ve Kütle Transferi*, Güven Kitabevi, İzmir.
- Çengel, Y. A. & Boles, M. A.** (2008). *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, İzmir Güven Kitabevi, İzmir,
- Darkwa, J., Kokogiannakis, G., Magadzire, C. L., & Yuan, K.** (2011). *Theoretical And Practical Evaluation Of An Earth-Tube (E-Tube) Ventilation System*, Energy And Buildings, 43, 728–736.

Doğan, F. B. (2014). *Eş merkezli dönen iki silindir arasında oluşan taylor ve vonkarman vortekslerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi) TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara, 36-38.

Düz, H. (2013). *Giriş ve tam gelişmiş akış bölgesinde laminar-türbülans geçiş özelliklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*. (Doktora Tezi) Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Elâzığ, 35-36.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) (2023). *Elektrik faturalarına esas tarife tutarı* [Erişim:20.02.2023, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tabloları>]

Esen, H., İnallı, M., & Esen, M. (2007). *Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system*. Building and Environment,42(3), 1126-1137.

Gan, G. (2014). *Dynamic interactions between the ground heat exchanger and environments in earth–air tunnel ventilation of buildings*. Energy and Buildings,85, 12-22.

Gedik, E. (2012). *Silindirik borularda manyetohidrodinamik akışın deneysel olarak incelenmesi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile sayısal analizi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi.

Hepbaşlı, A. (2013). *Low Exergy Modelling And Performance Analysis Of Greenhouses Coupled To ClosedEarth-To-AirHeat Exchangers (Eahes)*. Energy And Buildings, 64,224–230.

Hürdoğan, E., Saltan, E. G., Çerçi. N.K., Kara. O., & Özalp, C. (2018). *Farklı Yapıya Sahip Seralar için Isıtma İhtiyacının Belirlenmesi*. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi.02, 54-59

İnallı, M., & Esen, H. (2005). *Seasonal cooling performance of a ground-coupled heat pump system in a hot and arid climate*. Renewable Energy, 30(9), 1411-1424.

J, Chen., L, Xia., & B, Li. D. (2015). *Mereki, Simulation and experimental analysis of optimal buried depth of the vertical U-tube ground heat exchanger for a ground– coupled heat pump system*, Renew. Energy 73,46–54.

Karaman, U. (2018). *Ayır açlı bir yakıt demetinde Akışın Türbülans Karakteristiklerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Metoduyla İncelenmesi Sayısal olarak incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi) Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara, s.50.

- Kim, H.K., Ryou, Y.S., Kim, Y.H., Lee, T.S & Oh, S.S.** (2021). *Estimating the Thermal Properties of the Cover and the Floor in a Plastic Greenhouse*. *Energies* 14, 1970. <https://doi.org/10.3390/en14071970>, 1-11.
- Kocatürk, M., & Salman, M. S.** (2006). *Otomobil klima sisteminde fan devri ve giriş havası sıcaklığının performansa etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. *Politeknik Dergisi*, 9(1).
- Koç, A., Bahadıroğlu, A., Atay, B. N., & Ünver, Ü.** (2021). *Soğutucu Akışkan Performanslarının Farklı Kriterlere Göre Karşılaştırılması*. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1).
- Mathur, J., Bansal, N. K., Mathur, S., & Jain, M.** (2006). *Experimental investigations on solar chimney for room ventilation*. *Solar Energy*, 80(8), 927-935.
- Mehdiyev, N.** (2009). *Yüksek süratli kayıcı bir teknenin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile form optimizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi) Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, 16-17.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)** (2023). *Eskişehir ili aylık sıcaklık ortalamaları istatistiksel verileri* [Erişim:20.02.2023, <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=Eskişehir>]
- Mihalakakou, G.** (2003). *On the heating potential of a single buried pipe using deterministic and intelligent techniques*. *Renewable Energy*, 28(6), 917-927.
- Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G. D., Mathur, J., & Aseri, T.** (2013). *Transient analysis based determination of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger in winter*. *Energy and Buildings*, 58, 76-85.
- Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G. D., Mathur, J., & Aseri, T. K.** (2013). *CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger*. *Applied Energy*, 103, 266-277.
- Mongkon, S., Thepa, S., Namprakai, P., & Pratinthong, N.** (2013). *Cooling Performance And Condensation Evaluation Of Horizontal Earth Tube System For The Tropical Greenhouse*, *Energy And Buildings*, 66, 104–111.
- Özdemir, A., Pınarlık, M., & Ercan, E.** (2017). *Sürdürülebilir binalar için dünyada uygulanan devlet teşvikleri ve uygulamaların incelenmesi*. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 10(1).

Özgener, L. (2011). *A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(9), 4483-4490.

Özgener, L. & Özgener, O. (2010). *An experimental study of the exergetic performance of an underground air tunnel system for greenhouse cooling*. Renewable Energy, 35(12), 2804-2811.

Özgener, O., & Özgener, L. (2011). *Determining The Optimal Design Of A Closed Loop Earth To Air Heat Exchanger For Greenhouse Heating By Using Exergoeconomics*, Energy And Buildings, 43, 960–965.

Özgener, O., Özgener, L., & Tester, J. W. (2013). *A Practical Approach To Predict Soil Temperature Variations For Geothermal (Ground) Heat Exchangers Applications*, International Journal Of Heat And Mass Transfer, 62, 473–480.

Özkan, M., & Erkan, O. (2022). *Control of a boundary layer over a wind turbine blade using distributed passive roughness*, Renewable Energy, vol. 184, pp. 421-429, doi: 10.1016/j.renene.2021.11.082.

Peretti, C., Zarrella, A., De Carli, M., & Zecchin, R. (2013). *The Design And Environmental Evaluation Of Earth-To-Air Exchangers (Eahe). A Literature Review*, Renewable And Sustainable Energy Reviews 28, 107–116.

Pfafferott, J. (2003). *Evaluation Of Earth-To-Air Heat Exchangers With A Standardised Method To Calculate Energy Efficiency*, Energy And Buildings, 35, 971–983.

R, Thundil Karuppa & Raj, S. Ganne. (2012). *Shell side numerical analysis of a shell and tube heat exchanger considering the effects of baffle inclination angle on fluid flow*, Thermal Science, vol. 16, no. 4, pp. 1165-1174, doi:10.2298/TSCI110330118R.

Sevel, M. H. (2017). *Sulu-Havalı iklimlendirme sistemleri ve endüksiyon cihazları Soğutma Dünyası* 20

Seydişehir Alüminyum Boru Üretim Tesisi (2023). *Alüminyum içi boş boru profil ölçüleri* [Erişim:20.02.2023, <https://seydisehiraluminyum.com.tr/aluminyum-boru-profil/>]

Söğüt, M. Z., & Karakoç, H. (2013). *Klimalarda Enerji Verimliliği Sınıflandırılmasında Farklı Bir Yaklaşım: Ekserjetik Verimlilik Oranı ve Çevresel Etki Oranı*. Tesisat Mühendisliği Dergisi,135.

Tan, L., & Love, J. A. (2013). *A Literature Review On Heating Of Ventilation Air With Large Diameter Earth Tubes In Cold Climates*, *Energies* 6, 3734-3743.

Taşdelen, F. (2015). *Bir Binanın Termal konforunu Sağlamak İçin Tasarlanan Toprak hava değiştiricisinin Bilgisayar Destekli Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü. Elâzığ, s.11.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2023). *Güneş enerjisi atlası enerji değerleri* [Erişim:20.02.2023, <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>]

Töre, H., & Kılıçarslan, A. (2016). *Dış ortam sıcaklığının soğutma durumunda çalışan ısı pompası performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. ESSİAD Soğutma Dünyası Dergisi, 19(73).

Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2008). *Computational fluid dynamics:a practical approach*. Butterworth-Heinemann.

Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Essex: Pearson Education Limited, s.91.

Wu, H., Wang, S., & Zhu, D. (2007). *Modelling and evaluation of cooling capacity of earth–air–pipe systems*. *Energy Conversion and Management*, 48(5), 1462-1471.

Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Kaynaklı, Ö., Coşkun, S., & Yamankaradeniz, N. (2012). *İklimlendirme Esasları ve Uygulamaları*, Dora Yayınları.

Yıldız, A., Ozgener, O., & Ozgener, L. (2011). *Exergetic Performance Assessment OF Solar Photovoltaic Cell (Pv) Assisted Earth To Air Heat Exchanger (Eahe) System For Solar Greenhouse Cooling*, *Energy And Buildings*, 43, 3154– 3160.

Zhang, J., & Haghghat, F. (2009). *Convective heat transfer prediction in large rectangular cross-sectional area Earth-to-Air Heat Exchangers*. *Building and Environment*, 44(9), 1892-1898.