

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR ISI DEPOLAMA SİSTEMİNİN
MEKANİK VE ISIL TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Hakan İbrahim TOL**

Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KATI CİSİMLERİN MEKANİĞİ

EYLÜL 2008

**BİR ISI DEPOLAMA SİSTEMİNİN
MEKANİK VE ISIL TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Hakan İbrahim TOL
(503051501)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Eylül 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Eylül 2008**

Tez Danışmanları : Prof.Dr. Alaeddin ARPACI

Eş Danışmanı : Prof.Dr. Nurdil ESKİN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Ahmet Korhan BİNARK (M.Ü.)

Prof.Dr. İsmail Cem PARMAKSIZOĞLU

Prof.Dr. Reha ARTAN

EYLÜL 2008

ÖNSÖZ

Öğrenim hayatım boyunca desteklerini benden hiç esirgememiş olan aileme ve tez danışmanlarım Prof. Dr. Alaeddin ARPACI ve Prof. Dr. Nurdil ESKİN'e saygı ve sevgilerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde desteklerini esirgemeyen Sn. Selçuk ATAŞ, Sn. Fatih ARUK ve Sn. Onur OZANSOY'a teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışma konusunu bana kazandıran proje yöneticim Dr. Cengiz GÜNGÖR ile proje arkadaşlarım Sn. Murat KAHRAMAN ve Sn. Gökhan GÜNDOĞDU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2008

Hakan İbrahim TOL

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. ISI DEPOLAMA SİSTEMLERİNE ÖRNEKLER	5
2.1. Fynsværket Santralı Isı Depolama Sistemi	5
2.2. Avedøre Santralı Isı Depolama Sistemi	6
2.3. Studstrup BIG Santralı Isı Depolama Sistemi	7
2.4. Amagerværket Santralı Isı Depolama Sistemi	7
2.5. Asnæs BIG Santralı Isı Depolama Sistemi	8
2.6. Maribo-Sakskøbing Santralı Isı Depolama Sistemi	8
2.7. Linz Mitte Santralı Isı Depolama Sistemi	9
2.8. Vuosaari B Santralı Isı Depolama Sistemi	9
2.9. Nordjyllandsværket Santralı Isı Depolama Sistemi	10
2.10. Isı Depolama Sistemlerine Örnekler - Sonuç	11
3. ISI DEPOLAMA SİSTEMİ TASARIMINA ETKİ EDEN ETKENLER	12
3.1. IDS Tasarımını Belirleyen Etkenler	12
3.1.1. Isıl enerji depolayıcı ortam	13
3.1.2. İletim hattına bağlantı şekli	16
3.1.3. Isı depolama tankı	18
3.1.3.1. Isı depolama tankı türü	18
3.1.3.2. Isı depolama tankı geometrisi	18
3.1.3.3. Yükseklik/Çap oranı (H/D)	18
3.1.3.4. Isı depolama tankı konumu	19
3.1.3.5. Çoklu depolu ısı depolama sistemi	19
3.1.4. Yayıcı	21
3.2. IDS'i Koruyucu Diğer Etkenler	23
3.2.1. Yalıtım	23
3.2.2. Korozyondan korunma	23
3.2.3. Hava şartlarından korunma	25
3.3. Isı Depolama Sistemi Tasarımına Etki Eden Etkenler - Sonuç	25
4. IDT'NİN ISIL ve MEKANİK BOYUTLANDIRILMASI	27
4.1. Isı Depolama Sisteminin Isıl Tasarımı	28
4.1.1. Tasarım şartları	28
4.1.2. IDT'nin ön boyutlandırması	28
4.1.3. CFD analiz modeli, sınır koşulları, kabuller ve boşaltma verimliliği	30
4.1.3.1. CFD modelinin tanımı	30
4.1.3.2. Kabuller ve sınır koşulları	32
4.1.3.3. Çözüm ağının oluşturulması	33

4.1.3.4. Boşaltma verimliliği ifadesi	35
4.1.4. CFD analizi yardımıyla IDT'nin ısı tasarımı	36
4.1.4.1. Yükseklik/çap oranı	37
4.1.4.2. Yayıcı plaka çapı	38
4.1.4.3. Giriş - çıkış boru çapı	39
4.1.4.4. CFD analizi yardımıyla IDT'nin ısı tasarımı - sonuç	41
4.1.5. Yalıtım kalınlığının belirlenmesi	42
4.1.6. Isı depolama sisteminin ısı tasarımı - sonuç	48
4.2. IDT'nin Mekanik Boyutlandırması	48
4.2.1. Basıncılı kap tasarımı	49
4.2.1.1. İç Basıncı altındaki IDT'nin et kalınlığı	49
4.2.1.2. Basıncılı kap başlığı için et kalınlığının belirlenmesi	50
4.2.2. Sonlu eleman analizi	52
4.2.2.1. SEA modeli	52
4.2.2.2. Gerilme ve yer değiştirme dağılımı	53
4.2.3. SEA sonucu	61
4.3. IDT'nin Mekanik Boyutlandırması - Sonuç	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	67

KISALTMALAR

BIG	: Birleşik Isı-Güç Santrali
BIS	: Bölge Isıtma Sistemi
CFD	: Computational Fluid Dynamics
IDS	: Isı Depolama Sistemi
IDT	: Isı Depolama Tankı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Dünyadaki Isı Depolama Sistemlerinden Bazı Örnekler	5
Tablo 3.1 Tasarım Etkenleri Ve Yapılan Seçim	26
Tablo 4.1 Farklı Sıcaklıklarda Su Ve Çeliğin Fiziksel Özellikleri	28
Tablo 4.2 IDT'nin Ön Tasarım Boyutları	30
Tablo 4.3 CFD Analizi Sonucu IDT'nin Boyutları [mm]	42
Tablo 4.4 Havanın Fiziksel Özellik Değerleri	47
Tablo 4.5 Yalıtım Kalınlığı Tasarım Girdileri	47
Tablo 4.6 IDT Isı Kaybı Sonuç Değerleri	48
Tablo 4.7 IDT'de Gerçekleşen En Yüksek Gerilme Değerleri	58
Tablo 4.8 Gövde, Torisferik ve Düz Başlık İçin Sonuç Et Kalınlık Değerleri	61

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : IDS'nin BIS'a Bağlantısı	1
Şekil 1.2 : IDS'a İhtiyaç Olunan Durum – 1 [4]	2
Şekil 1.3 : IDS'a İhtiyaç Olunan Durum – 2 [4]	2
Şekil 1.4 : IDS'nin BIS Kurulum Kapasitesine Etkisi [4]	3
Şekil 2.1 : Fynsværket Santralı IDS [5]	6
Şekil 2.2 : Avedøre BIG Santralı IDS [2]	6
Şekil 2.3 : Studstrup BIG Santralı IDS [10]	7
Şekil 2.4 : Amager Santralı IDS [11]	7
Şekil 2.5 : Asnæs BIG Santralı IDS [2]	8
Şekil 2.6 : Maribo-Sakskobing BIG Santralı IDS [2]	8
Şekil 2.7 : Linz Mitte BIG Santralı Isı Depolama Sistemi [12]	10
Şekil 2.8 : Vuosaari B Santralı Buhar Akış Diyagramı [13]	10
Şekil 2.9 : Nordjyllandsværket Santralı IDS [14]	11
Şekil 2.10 : Farklı Tarife Zaman Dilimlerinde IDS Kullanımı [14]	11
Şekil 3.1 : Isıl Enerji Depolayıcı Ortamın Belirlenmesi	12
Şekil 3.2 : IDS'nin BIS İletim Hattına Bağlantı Şekli	12
Şekil 3.3 : IDT Tasarım Seçim Kıstasları	13
Şekil 3.4 : Gizli – Duyulur Isıl Enerjisi Depolama Farkı	14
Şekil 3.5 : Sıcaklık Katmanlaşmalı IDS [4]	16
Şekil 3.6 : Direkt Bağlantı - Atmosferik IDT [4]	17
Şekil 3.7 : İndirekt Bağlantı - Basıncılı IDT [4]	17
Şekil 3.8 : Eşanjörlü Bağlantı – Atmosferik IDT [4]	17
Şekil 3.9 : Yatay IDT [1]	19
Şekil 3.10 : Seri Bağlı İki Depolu IDS [8]	20
Şekil 3.11 : Seri Bağlı Üç Depolu IDS [8]	21
Şekil 3.12 : Üç Depolu IDS [8]	21
Şekil 3.13 : Yayıcının Sıcaklık Katmanlaşmasına Katkısı [4]	22
Şekil 3.14 : Çeşitli Yayıcı Tipleri [4]	22
Şekil 3.15 : Yatay Yayıcı Örneği [17]	22
Şekil 3.16 : Dikey Yayıcı Örneği [17]	23
Şekil 3.17 : Su Hızlarını Düşürücü Dikey Yayıcı Örneği [1]	23
Şekil 3.18 : IDT'de Görülen Çeşitli Korozyon Örnekleri [1]	24
Şekil 3.19 : Battaniyeleme Sisteminin Çalışma Prensibi [4]	25
Şekil 3.20 : Isı Depolama Tankı [4]	26
Şekil 4.1 : Tasarım Akış Şeması	27
Şekil 4.2 : IDT Su Ortamı	30
Şekil 4.3 : Çözümü Sayısal Ağdan Bağımsızlaştırma Çalışması	34
Şekil 4.4 : IDT Üst Yarısı Çözüm Ağı Yapısı	34

Şekil 4.5	: CFD Analizlerinde İncelenen Parametreler	36
Şekil 4.6	: Farklı Hs/Ds Oranları İçin Boşaltma Verimliliğinin Değişimi	37
Şekil 4.7	: Farklı Hs/Ds Oranları İçin Sıcaklık Dağılımının Değişimi	37
Şekil 4.8	: Tasarımda Kullanılacak Yayıcı Tipi	38
Şekil 4.9	: Yayıcı Çapının Depo Çapına Oranı (Dy/DS)	38
Şekil 4.10	: Yayıcı Çapı/Depo Çapı Oranının Büyük Olmasının Etkisi	39
Şekil 4.11	: Farklı Dy/Ds Oranları İçin Boşaltma Verimliliğinin Değişimi	39
Şekil 4.12	: Boru Çapının Boşaltma Verimliliğine Olan Etkisi Hs/Ds=1	40
Şekil 4.13	: Boru Çapının Boşaltma Verimliliğine Olan Etkisi Hs/Ds=1,5	41
Şekil 4.14	: CFD Çözümü – Akış Ve Isıl Analiz Görüntüleri	42
Şekil 4.15	: Yalıtım Kalınlığının Şematik Şekli	43
Şekil 4.16	: IDT Su Ortamı Ve Yalıtım Boyutları [mm]	48
Şekil 4.17	: Torisferik Başlık	51
Şekil 4.18	: Düz Başlık	52
Şekil 4.19	: IDT Modeli ve Oluşturulan Çözüm Ağı	53
Şekil 4.20	: IDT'e Etkiyen Mekanik Yükler	54
Şekil 4.21	: IDT Üstündeki Gerilme Dağılımı	54
Şekil 4.22	: Adam Giriş Deliği Çevresindeki Gerilme Dağılımı	55
Şekil 4.23	: Üst Boru Girişi Çevresindeki Gerilme Dağılımı	55
Şekil 4.24	: Alt Boru Girişi Çevresindeki Gerilme Dağılımı	56
Şekil 4.25	: Üst Yayıcı Üzerinde Gerçekleşen Gerilme Dağılımı	56
Şekil 4.26	: Alt Yayıcı Üzerinde Gerçekleşen Gerilme Dağılımı	57
Şekil 4.27	: Torisferik Başlık Üzerinde Gerçekleşen Gerilme Dağılımı	57
Şekil 4.28	: IDT Üstündeki Yer Değiştirme Dağılımı	58
Şekil 4.29	: Adam Giriş Deliği Çevresindeki Yer Değiştirme Dağılımı	59
Şekil 4.30	: Üst Yayıcı Üzerinde Gerçekleşen Yer Değiştirme Dağılımı	59
Şekil 4.31	: Alt Yayıcı Üzerinde Gerçekleşen Yer Değiştirme Dağılımı	60
Şekil 4.32	: Alt ve Üst Boru Girişi Çevresindeki Yer Değiştirme Dağılımı	60
Şekil 4.33	: IDT'nin Isıl ve Mekanik Boyutlandırması Sonucu	61

SEMBOL LİSTESİ

C_1, C_2	: İntegral Sabitleri
C_p	: Özgül Isı
D_y	: Yayıcı plaka çapı
D_b	: Giriş-Çıkış Boru Çapı
E	: Kaynak verim katsayısı
g, g_r, g_θ, g_z	: Yer çekimi ivmesi
H_S/D_S	: IDT içerisindeki su ortamının yükseklik/çap oranı
H_{tank}	: Isı Depolama Tankı yüksekliği
h_{yy}, h_{taban}	: Yan yüzeydeki ve taban&tavandaki ısı taşınım katsayısı
k	: Isıl iletkenlik katsayısı
K	: Emniyet katsayısı
$Nu_{yy}, Nu_{\text{taban}}$	: Yan yüzeydeki ve taban&tavandaki Nusselt Sayısı
p_t	: İzin verilen en büyük çalışma basıncı
P_a, P_h	: IDT'e etkiyen azot ve su basıncı
Q_{IDT}	: Isı depolama tankı ısı depolama kapasitesi
$\dot{Q}_{\text{IDT}}$	: Yükleme-boşaltma gücü
$\dot{Q}_{yy}, \dot{Q}_{\text{taban}}$	: Yan yüzeydeki ve taban&tavandaki ısı kaybı
R_S	: Depo iç yarıçapı
r	: Torisferik başlık köşe yarıçapı
r, θ, z	: Silindirik Koordinatlar
V_{DA}	: Isı depolama tankı içerisindeki suyun hacmi
$\dot{V}$	: Hacimsel debi
T	: Değişken Sıcaklık
T_{ref}	: Referans Sıcaklık
t^*	: ΔT 'nin belirli bir değere düşmesi için geçen zaman
T_g, T_ϕ	: Isı depolama tankına giren ve çıkan suyun sıcaklığı
$t_{\text{yalıtım}}$	: Yalıtım Kalınlığı
t_g, t_{bt}, t_{bd}	: Gövde, torisferik ve düz başlık için et kalınlığı
t_{yp}	: Gövde, torisferik ve düz başlık için yenim payı
U_r, U_θ, U_z	: Hız Bileşenleri
β	: Isıl Genleşme Katsayısı
γ	: Yakınsama İfadesi
Δ	: Önüne geldiği ifadedeki farkı göstermektedir
Δh	: Çözüm ağı çözüm noktaları arası en kısa mesafe
Δt	: Daimi olmayan çözüm zaman aralığı
ΔT	: Isı depolama tankı giriş-çıkış sıcaklık farkı
η	: Boşaltma verimlilik ifadesi
μ	: Viskozite
u	: Kinematik viskozite
ρ	: Yoğunluk
σ_1, σ_2	: Asal gerilmeler
σ_a	: Akma dayanımı
σ_{em}	: İzin verilen gerilme değeri
Φ	: Viskoz Disipasyon Terimi

BİR ISI DEPOLAMA SİSTEMİNİN MEKANİK VE ISIL TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada; bölge ısıtma sistemlerinde santral ısı arzı ile yerleşim birimi ısı talebi arasındaki uyumsuzluğun önüne geçmek ve santraldaki ısı ve elektrik üretiminde esneklik sağlamak için kurulan ısı depolama sisteminin tasarım yöntemi üzerine çalışılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde, ısı depolama sistemi hakkında kısa bilgi verilmiş ve ısı depolama sisteminin bölge ısıtma sistemine sağladığı yararlar anlatılmıştır.

İkinci bölümünde, bölge ısıtma sistemlerinde kullanımda olan ısı depolama sistemlerinin belli başlıları hakkında genel bilgi verilmiştir.

Isı depolama sistemi tasarımına etki eden etkenler bölümünde, tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken etkenler açıklanmıştır. Isı depolama sisteminin sınır koşullara uygun olarak tasarımın nasıl belirlenmesi gerektiğini söyleyen etkenler, tasarım esnasında ısı depolama sistemi boşaltma verimliliğini belirleyen etkenler ve IDT'nin ömrünü belirleyen etkenler bu bölümde aktarılmıştır. Bu bölümün sonunda prototip ısı depolama sistemi tasarımının nasıl olması gerektiği sonuç olarak verilmiştir.

IDT'nin boyutlandırılması bölümünde, IDT'nin tasarım aşamaları anlatılmıştır. Öncelikle ısı depolama tankı içerisinde bulunan ısı enerji depolayıcı su ortamının ön boyutlandırması aktarılmış, daha sonra CFD analizi yardımıyla ısı depolama sistemi boşaltma verimliliğini en yüksek yapacak şekilde boyutlandırma yapım aşamaları yöntemi ve çıkan sonuçlar gösterilmiştir. Isıl enerji depolayıcı su ortamının boyutları belirlendikten sonra bu su ortamını muhafaza edecek ısı kaybını azaltacak yalıtımın kalınlığı belirlenmiş şekli bu bölümde anlatılmıştır. Son olarak, tasarımın diğer adımı olan IDT'nin mekanik tasarımında yapılan tank ve alt – üst başlık cidar kalınlıklarının boyutlandırması gösterilmiştir. Tankın mekanik boyutlandırmasından sonra SEA analizi gerçekleştirilmiş ve tank üstünde oluşan gerilme ile yer değiştirme dağılımı izlenmiştir. SEA analizi ile analitik olarak belirlenmiş boyutların mukavemetinin ve yer değiştirmesinin izin verilen sınırlar içinde olduğuna emin olduktan sonra mekanik tasarım bitirilmiştir.

MECHANIC AND THERMAL DESIGN OF A HEAT STORAGE SYSTEM

SUMMARY

In this study; design methodology of a heat storage system is investigated. Heat storage system regulates discordance between heat production of cogeneration plant and head demand of consumer side; and provides flexibility of production between electric and heat production for cogeneration plant.

In the first section of the study, some information about heat storage system is given and advantages of heat storage system for district heating system is explained.

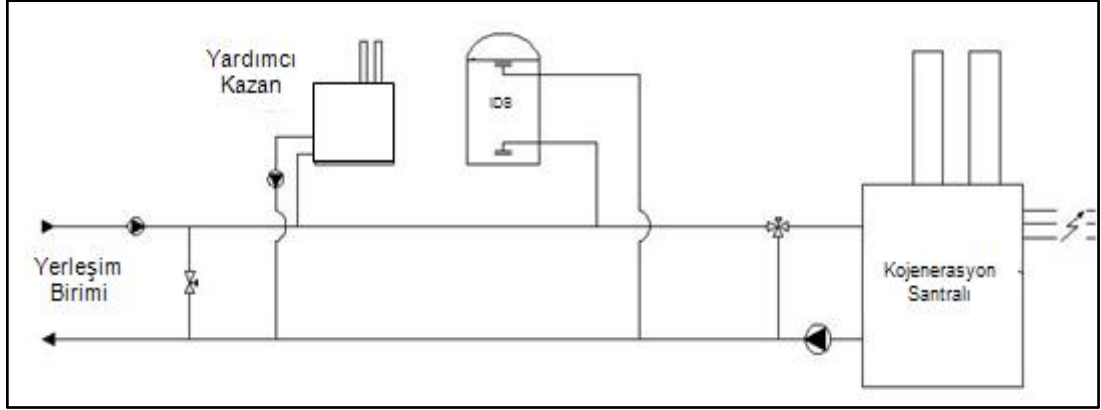
In the second section of the study, general information about heat storage systems which are utilized at some certain district heating systems is given.

In 'factors that affect design of heat storage system' section, factors that must be paid attention at design stage are stated. Factors that determine the type of design according to the design conditions and factors that affect the discharge efficiency at design stage are also described at this section. Beyond, factors that have influence on life cycle of heat storage tank are explained. At the end of this section, design type of prototype heat storage system is given as a result.

In 'dimensioning of heat storage tank' section, design stages of heat storage tank are described. Firstly, method of predimensioning of water volume as a thermal energy storage medium is narrated and later, method of final dimensioning of the volume by maintaining discharge efficiency maximum with the aid of CFD analysis and the results are shown. After dimensioning of the water volume, way of determining the insulation thickness which preserves heat loss from then storage tank is described. Finally, dimensioning of thickness of tank wall and head of tank is shown under the mechanical design step of design of heat storage tank. After the dimensioning the tank, FEM analysis is described and; stress and displacement distribution is shown. After verifying the strength and displacement of the dimensions which are calculated via analytical formulations by FEM analysis result, the mechanical design step is finished.

1. GİRİŞ

Bölge Isıtma Sisteminde (BIS) santral ısı arzı ve yerleşim birimi ısı talebi arasındaki uyumsuzluğun önüne Isı Depolama Sistemi (IDS) ile geçilir. IDS'ye ısı, santral ısı üretiminin yerleşim birimi ısı talebinden yüksek olduğu durumda depolanıp; elektriğe talebin yüksek olduğu, santraldan sağlanan ısıнын yerleşim biriminin ısı talebini karşılayamadığı veya santralin ısı üretimi yapamadığı durumlarda IDS'den BIS'a verilir. IDS, Birleşik Isı-Güç Santrali (BIG) ile BIS şebekesi arasında konumlandırılmaktadır (Şekil 1.1). Genel anlamda ısı kaynağından bağımsız olarak IDS, maliyet etkenliği sağlayarak BIG santralin verimini arttırmaktadır [1].

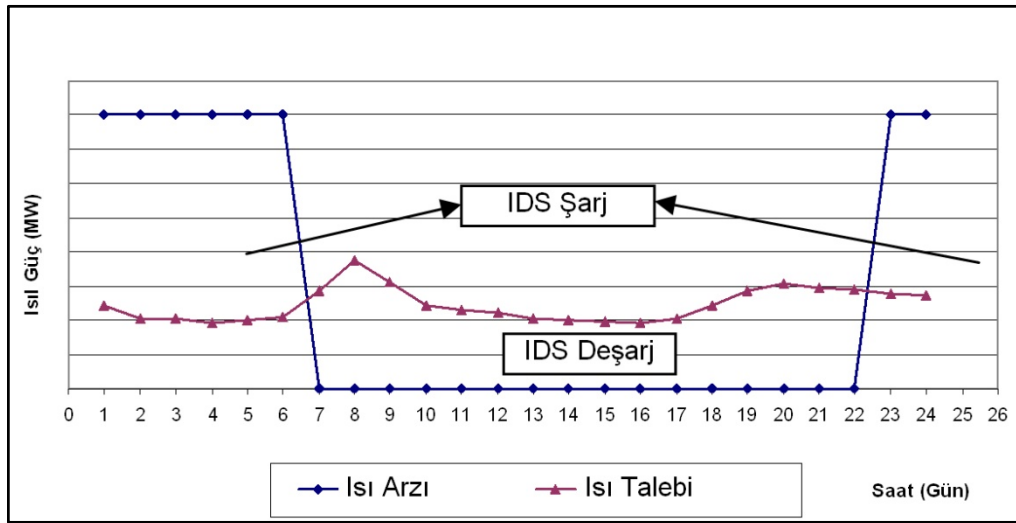


Şekil 1.1: IDS'nin BIS'a Bağlantısı

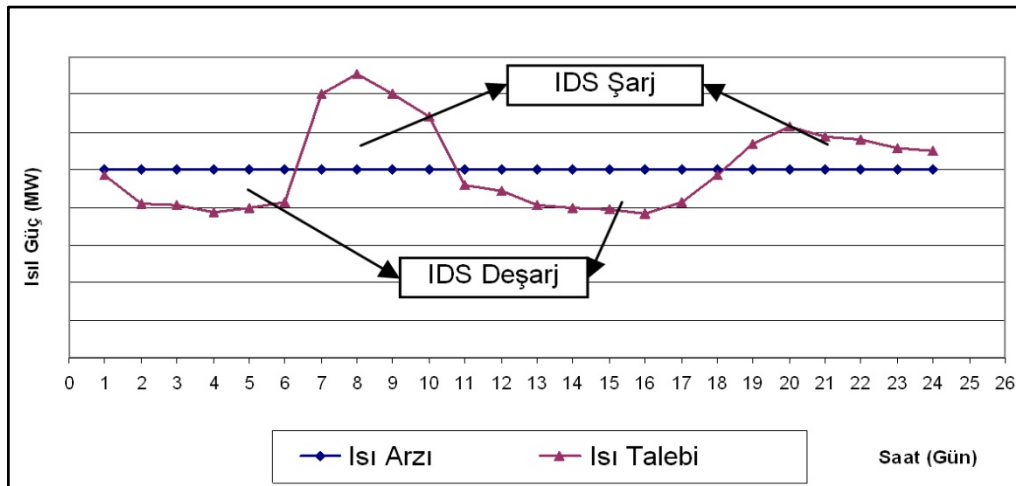
IDS'nin sağladığı genel yararlar aşağıda verilmiştir.

- IDS, ısı üretim kaynaklarının durmasına imkan tanıdığı için, üretim planlamasında esneklik sağlar.
- Elektriğe talebin arttığı, fakat santralin ısı da üretmek zorunlu olduğu zamanlarda ısıнын IDS'den sağlanması ile yerleşim birimi ısı konforunda kesinti olmadan şebekeye elektrik de tam yükte verilebilir. Yurtdışındaki BIS uygulamalarında elektrik ve ısı satışı marketleri farklı olduğundan bu durum farklı incelenebilmektedir. Elektrik birim satış fiyatının yüksek olduğu durumlarda yerleşim birimine ısı IDS'den sağlanarak santral gelirinin en yüksek olması sağlanmaktadır.
- Santralin kısa süreli devre dışı olduğu durumlarda ısıнын, IDS'den sağlanması ile BIS ile tüketiciye sunulan ısı konforunda kesinti yaşanmaz (Şekil 1.2).

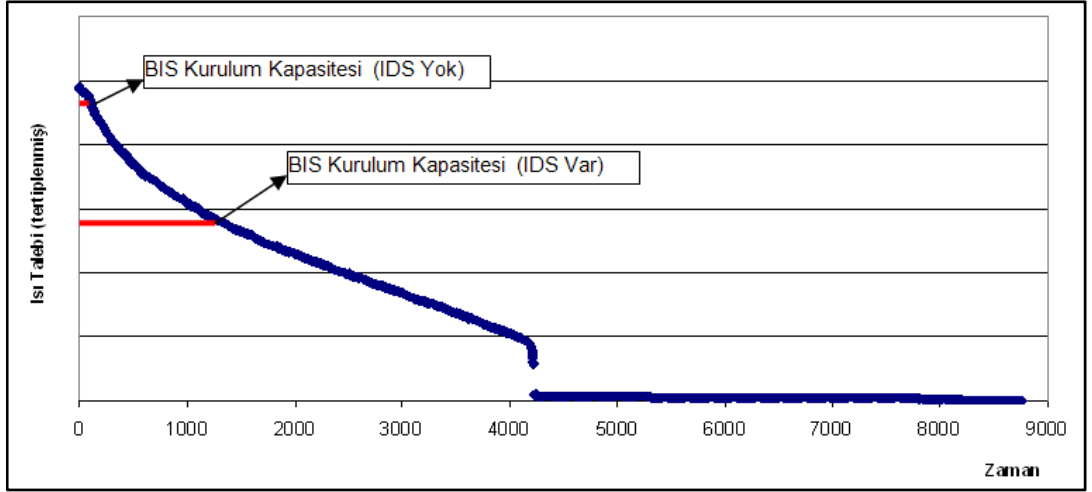
- Yerleşim birimi ısı ihtiyacının santral tarafından karşılanamadığı durumlarda IDS kullanılmaktadır (Şekil 1.3). Isı ihtiyacının yüksek olduğu durumlarda yedek ısı üretim kazanlarının yerini tamamen veya büyük oranda IDS alacağı için ek yakıt maliyetinde büyük oranda azalma olacaktır.
- Pik ısı talebinin olduğu anlarda tüm talebin santral tarafından karşılanması yerine belirli yükün IDS'den sağlandığı düşüncesi ile BIS kurulum aşamasında düşük kapasitede tasarlanabilmektedir (Şekil 1.4). Böylelikle IDS'nin kurulduğu BIS'ın yatırım maliyeti, IDS'nin ön görülmediği BIS'a göre daha düşük değerde olmaktadır [1, 2, 3].



Şekil 1.2: IDS'a İhtiyaç Olunan Durum – 1 [4]



Şekil 1.3: IDS'a İhtiyaç Olunan Durum – 2 [4]



Şekil 1.4: IDS'nin BIS Kurulum Kapasitesine Etkisi [4]

BIG santralında buhar türbininden ısı çekme yönteminin ara buhar almalı veya karşı basınçlı olmasına göre IDS'a olan ihtiyaç gerekçesi farklılık göstermektedir.

Ara buhar almalı BIG santralında sadece elektrik üretilebildiği gibi elektrik ve ısı değişik oran kombinasyonlarında üretilebilir. En yüksek ısı üretiminin olduğu anda elektrik üretimi büyük oranda değişebilmektedir. Elektrik üretimindeki bu değişim ısı üretiminin aşağıda belirtilen anlarda kapatılması ile karşılanabilir.

- Elektrik fiyatlarının yüksek olduğu anlarda sadece IDS'den yerleşim birimine ısı sağlanabilir.
- Elektrik fiyatlarının düşük olduğu gece vakitlerinde düşük fiyatla üretilen ısı, IDS'e depolanır. Elektrik fiyatlarının yüksek olduğu gündüz vakitlerinde yerleşim birimine ısı sadece IDS'den sağlanır.

Karşı Basınçlı BIG santrallerinde elektrik ve ısı sabit oranda üretilmektedir. Elektrik üretimi açısından bakıldığında elektrik ve ısının sabit oranda üretilmek zorunda olması dezavantaj olarak görülmektedir. IDS'nin bu ısı çekme yönteminin uygulandığı bölge ısıtma sistemlerindeki amacı:

- Karşı Basınçlı BIG santrallerinde elektrik ve ısı sabit oranda üretildiğinden dolayı; BIG santralının elektrik üretimine zorlandığı durumlarda yerleşim birimi ısı talebi azsa veya yoksa, IDS bu ısıyla yüklenir. Elektriğe talebin azaldığı anlarda santral üretimi durdurulup ısı yerleşim birimine IDS'den sağlanır [2].

BIS'ın ısı kaynağı gaz türbini veya içten yanmalı benzin motoru ise sistem tam yükte çalıştığı zaman en yüksek verimle yakıt kullanılmaktadır. Sistem kısmi yüklerde çalıştığında yakıt kullanım verimliliği azalmaktadır. IDS'nin kurulmasıyla gaz türbini

veya içten yanmalı motor her zaman en yüksek yakıt verimliliğinde çalıştırılıp atık ısı daha sonra kullanılmak üzere IDS'e depolanabilir [1].

Genel tanımı ve sağladığı yararları üstte aktarılan IDS'nin ısı ve mekanik tasarımı bu tezin konusudur. IDS'nin IDT'nin boyutlandırmasında gösterilecek yol farklı tasarım koşullarındaki ısı depolama tanklarının tasarlanmasına yol göstermektedir.

İlk bölümde dünyada bulunan ısı depolama sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Genel olarak ısı depolama sistemlerinin yapıları, kapasiteleri, yükleme-boşaltma güç değerleri, bağlı oldukları BIS gidiş-dönüş sıcaklıkları ve boyutları hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde IDT'nin tasarımında etkili olan tasarım etkenleri hakkında bilgi verilmiştir. Kısaca bu etkenlerin ısı depolama tankındaki etkileri incelenmiş ve uygulanacak prototip ısı depolama sisteminin sağladığı tasarım koşullarına uygunluk açısından bu etkenler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak farklı türlerde uygulanabilecek tasarım etkenlerinden tasarım koşullarına uygun olanları seçilip tasarım etkenlerinin boyutlandırmasına geçilmiştir.

Diğer bölümde bir önceki bölümde anlatılan ve seçilen tasarım etkenlerine göre boyutlandırma yapılmıştır. Literatürde önerilen boyut aralıklarından seçilen bir boyuta göre IDT'nin ön boyutlandırması yapılmış, daha sonra CFD analizleri yardımı ile boşaltma verimlilik değeri en yüksek olacak şekilde ısı depolama tankı su ortamı boyutları belirlenmiştir. IDT'nin depoladığı ısıyı tutma süresinde etkili olan yalıtım kalınlığı da bu bölümde incelenmiş ve yalıtım kalınlığı ortaya konulmuştur.

Su ortamı boyutları belirlendikten sonra IDT'nin mekanik tasarımına geçilmiştir. ısı depolama tankı su ortamı boyutlarına göre tank cidar kalınlıkları belirlenmiş ve Sonlu Elemanlar Analizi ile tank üstünde oluşacak gerilme ve yer değiştirme değerleri kontrol edilmiştir.

2. ISI DEPOLAMA SİSTEMLERİNE ÖRNEKLER

Yurtdışındaki pek çok BIG santrallerinde ısı depolama sistemleri kullanılmaktadır. Tablo 2.1’de dünyadaki ısı depolama sistemlerinden bazıları hakkında genel bilgi verecek teknik veriler bulunmaktadır. Alt başlıklarda, şu anda çalışmakta olan ısı depolama sistemlerinin bazıları hakkında genel bilgi verilmiştir.

Tablo 2.1: Dünyadaki Isı Depolama Sistemlerinden Bazı Örnekler

Santral	Ülke	Tank Türü	Kapasite GJ	Güç MJ/s	Tank Adedi	Hacim m ³	Çap (D) m	Yüks. (H) m
Fynsværket	Danimarka	Basıncılı	13.500	600	1	73.000	50	40
Studstrupværket	Danimarka	Basıncılı	7.500	-	1	27.000	-	-
Nordjyllandsværket	Danimarka	-	6.500	150	1	25.000	31,3	34
Linz Mitte	Avusturya	Atmosferik	4.700	-	1	34.500	26	65
Avedøre	Danimarka	Basıncılı	4.000	330	2	44.000	-	50
Vuosaari B	Finlandiya	Atmosferik	-	130	1	26.000	29	42
Amager	Danimarka	Basıncılı	4.000	330	1	24.000	26	36
Asnæs	Danimarka	Atmosferik	3.000	-	1	20.000	65	20
Maribo-Sakskøbing	Danimarka	Atmosferik	720	28,5	1	6.330	19	25

2.1 Fynsværket Santralı Isı Depolama Sistemi

Fynsværket santralı, Odense’ye BIS’a ısı sağlamaktadır. Santral 2.100 m²’lik bir alana kurulu 73.000 m³ hacme sahip ve ısı depolama kapasitesi 13.500 GJ olan bir ısı depolama tankına sahiptir (Şekil 2.1). IDS’nin yükleme-boşaltma gücü 600 MJ/s’dir. Atmosferik olarak tasarlanmış ısı depolama tankı, şebekedeki basınç koşulları da göz önünde bulundurularak 50 m çapında ve 40 m yüksekliğinde yapılmıştır (Açıklama için bakınız: Bölüm 3.1.2). Isı depolama tankı üst kısımdan başlayarak, aşağıya doğru inşa edilmiştir. İlk önce taban kısmının kaynakla bağlantısı yapılmıştır. Deponun üst kısmı, çelik konstrüksiyonların kullanıldığı küresel bir yapıdan oluşmaktadır. IDT’nin alt ve üst kısmına dört adet yayıcı monte edilmiştir. Kışın pik zamanlarda elektrik taleplerinin karşılanması için, ısı depolama tankı santralin 6 – 8 saat ısı üretimini durdurup, tam kapasiteyle elektrik üretmesine imkân sağlamaktadır. Yaz aylarında ise, santral hafta sonu boyunca tam kapasite elektrik üretimi yaparken yerleşim birimine ısı IDS’den sağlanmaktadır. IDS’nin kurulumu için yapılan yatırım yaklaşık 5,5 milyon Euro’dur [5].



Şekil 2.1: Fynsværket Santralı IDS [5]

2.2 Avedøre Santralı Isı Depolama Sistemi

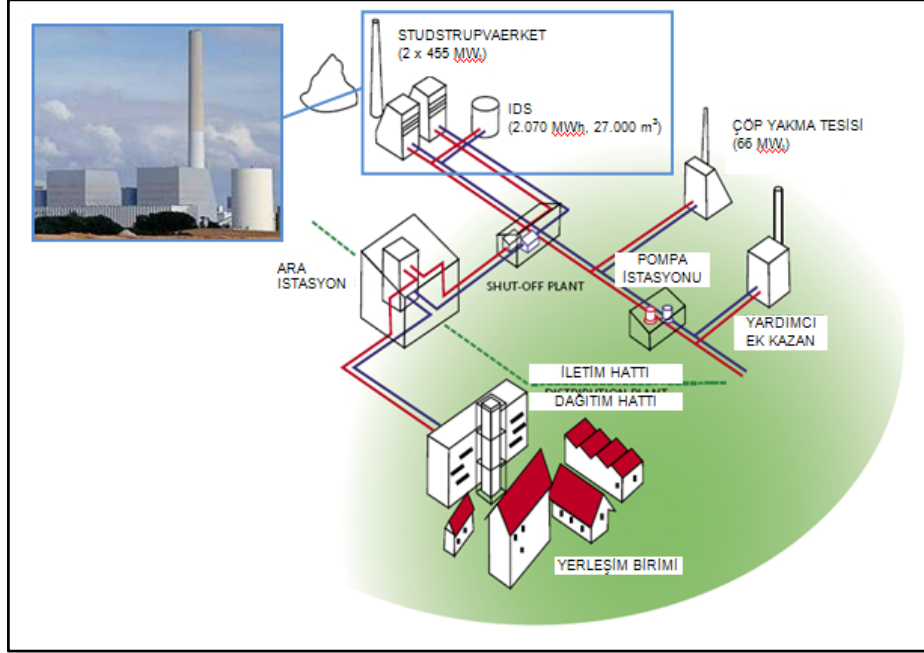
Avedøre santralı iki üniteden oluşmaktadır. Avedøre BIG santralı Ünite 1'in (Şekil 2.2) elektrik kapasitesi 250 MW_e olup BIS'a 330 MJ/s ısı sağlamaktadır. Ünite 1'in bu üretim değerleri Doğu Danimarka'nın elektrik talebinin %12'sini ve 75.000 konutun ısı talebini karşılamaktadır. Esnek üretim imkânı tanımak için santralda ısı depolama kapasitesi toplamda 8.000 GJ ve ısı yükleme-boşaltma gücü 330 MJ/s olan IDS bulunmaktadır. IDS, hacimleri 22.000 m³ olan özdeş iki basınçlı ısı depolama tankından oluşmaktadır. Santral ısı üretiminin en yüksek olduğu anlarda ısı verimlilik %91 seviyesinde olmaktadır. Düşük ısı talebinin olduğu anlarda IDS yüklenip daha sonra ısı talebinin arttığı anlarda boşaltılarak üretimde esneklik sağlanır. Ayrıca, santral kısmi yüklerde çalışırken ısı IDS'den sağlanarak santralın yüksek verimde çalışması sağlanmaktadır. 1992 yılında ısı depolama sistemlerinin kurulması için yapılan yatırım yaklaşık 5,5 milyon Euro'dur [2, 6, 7, 8].



Şekil 2.2: Avedøre BIG Santralı IDS [2]

2.3 Studstrup BIG Santralı Isı Depolama Sistemi

1968 yılından bu yana çalışmakta olan Studstrup santralı 280.000 konuta ısı sağlamaktadır. Santralda 70.000 m³ su ortamına sahip 7.500 GJ kapasiteli basınçlı ısı depolama tankı bulunmaktadır. IDS, değişen ısı talebine karşılık santral ısı ve elektrik üretimini optimize etmek için kurulmuştur (Şekil 2.3) [8, 9, 10].



Şekil 2.3: Studstrup BIG Santralı IDS [10]

2.4 Amagervaerket Santralı Isı Depolama Sistemi

Danimarka'da işletilen Amagervaerket santralı, ısı depolama kapasitesi 4.000 GJ olan bir basınçlı IDT'e sahiptir. 24.000 m³ hacimli ısı depolama tankı 26 m çap ve 36 m yüksekliğindedir (Şekil 2.4). Şebekeye sağlanacak sıcak su ve şebekeden dönen düşük sıcaklıktaki suyun depoya düşük hızlarda girmesi veya depodan çıkması için depoya 7 m çapında iki adet yayıcı monte edilmiştir [11].



Şekil 2.4: Amager Santralı IDS [11]

2.5 Asnæs BIG Santralı Isı Depolama Sistemi

Isı tedarik emniyeti ve bölge ısıtma fiyatlandırmasını cazip hale getirmek için 3.000 GJ kapasitesinde 20.000 m³’lük ısı depolama tankı Kalundborg BIS’e kurulmuştur. Isı depolama tankı, şebeke suyu sıcaklığı 98 °C olan ısı dağıtım şebekesine atmosferik depo olarak bağlanmıştır. İletim hattındaki statik basıncı dengelemek için deponun 65 m yüksekliği bulunmaktadır ve deponun çapı 20 m’dir. Yükseklik/çap oranının (H/D=3,25) büyük olmasında dolayı tankın temeli için ortaya çıkan yatırım maliyeti yüksek çıkmıştır (Şekil 2.5) [2].



Şekil 2.5: Asnæs BIG Santralı IDS [2]

2.6 Maribo-Sakskøbing Santralı Isı Depolama Sistemi

Bölge ısıtmanın elverişli bir şekilde yapılabilmesi amacıyla; santralda ısı yükleme-boşaltma gücü 28,5 MJ/s ve kapasitesi 720 GJ olan IDS bulunmaktadır (Şekil 2.6). 6.330 m³ hacimli IDT’nin çapı 18,5 m olup, şebekedeki basınçların dengelenmesi için yüksekliği 25 m olarak tasarlanmıştır. 2000 yılında IDS’nin kurulması için yapılan yatırım yaklaşık 550.500 Euro’dur [2].



Şekil 2.6: Maribo-Sakskøbing BIG Santralı IDS [2]

2.7 Linz Mitte Santralı Isı Depolama Sistemi

Linz Mitte Santralı'nda 34.500 m³'lük hacimli ısı depolama tankına (26 m çap ve 65 m yükseklik) sahip bir IDS bulunmaktadır. Isı depolama tankı atmosferik basınçta çalışmaktadır ve tankın suyla temas etmeyen üst bölümünde hava girişini engellemek amacıyla buhar tabakası bulunmaktadır. Isı kaybını en az indirmek amacıyla ısı depolama tankı, 500 mm yalıtım malzemesi (ısı iletim katsayısı <0,05 W/m² K) ile yalıtılmıştır. 97 °C iletim hattı gidiş ve 57 ~ 60 °C dönüş sıcaklığına sahip IDS'nin ısı depolama kapasitesi en yüksek 4.700 GJ olmaktadır.

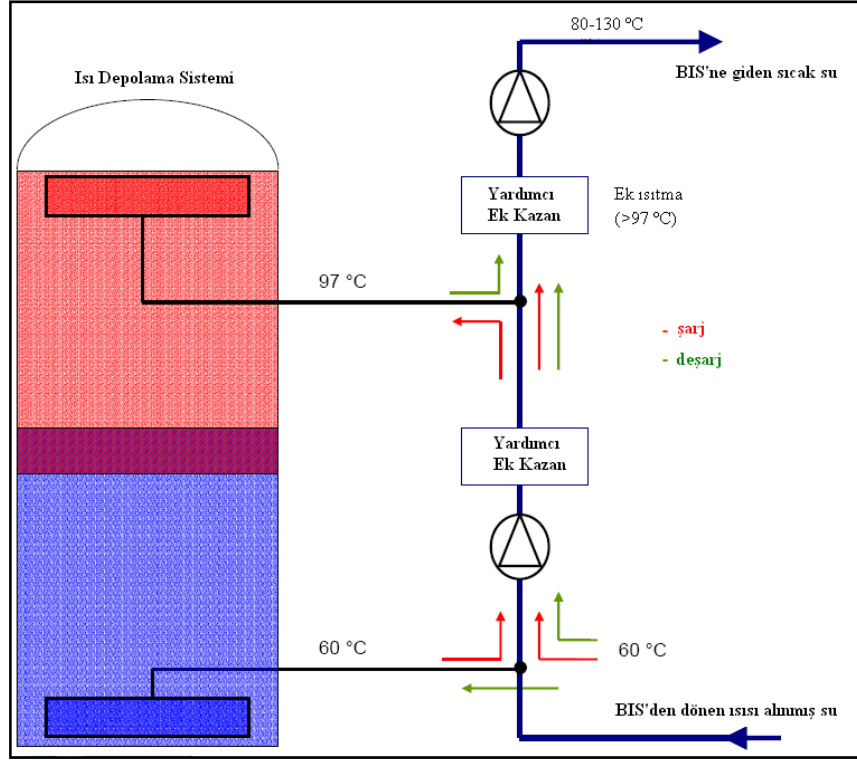
Kış zamanında IDS gece (22:00 – 06:00) saatlerinde yüklenip gün içinde boşaltılmaktadır. Yaz zamanında; santralın hafta içi ısı üretim imkanının fazla olduğu anlarda IDS depolanmaktadır ve hafta sonu yerleşim birimine ısı sadece IDS'den sağlanmaktadır. İlkbahar ve sonbahar mevsimlerinde ise IDS'nin çalışma sistemi elektrik birim fiyatına ve ısı talebine bağlı olmaktadır. Bu gibi durumlarda IDS'nin en önemli vasfı, sabah zamanlarındaki pik ısı talebini karşılıyor olmasıdır ve böylelikle yardımcı ek kazanlara ihtiyaç olmamaktadır. Gün içinde elektrik üretimi sabit yükte olmaktadır ve bu esnada üretilen ek ısı IDS'de depolanmaktadır.

Linz Mitte Santralı'nın IDS'den elde ettiği faydalar aşağıdaki maddelerde belirtilmiştir (Şekil 2.7) [12].

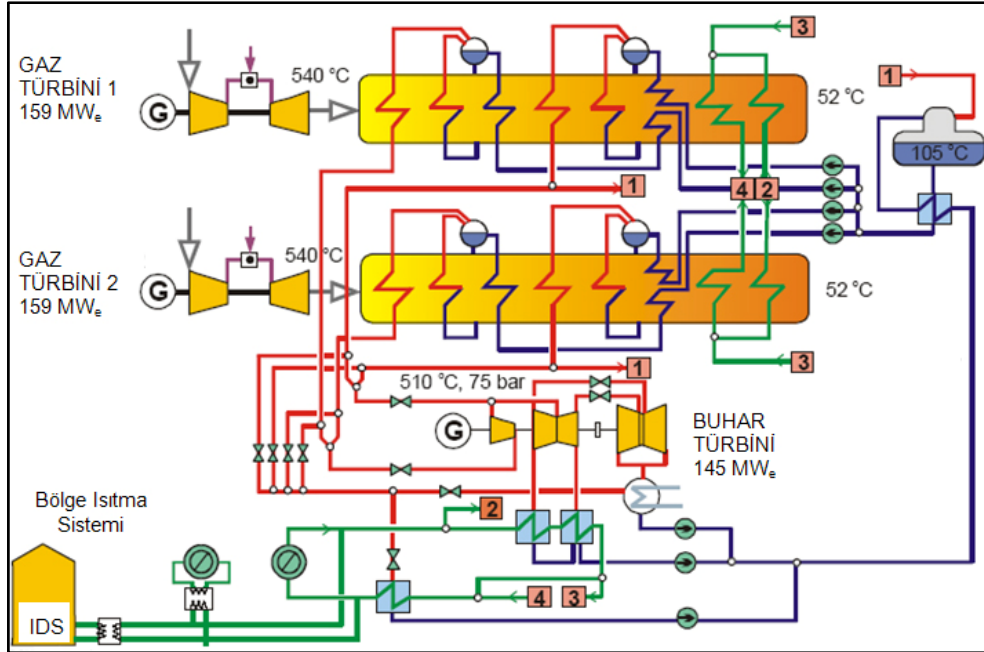
- Yardımcı ek kazanların daha önceye göre nispeten az kullanılması,
- Yakıt kullanımının verimli olmasına imkan tanınması,
- Yakıt ve CO₂ emisyonlarındaki azalmalar,
- Santralda gerçekleşebilecek umulmadık andaki durma anında depolanan enerjinin yerleşim birimi ısı konforunda kesinti yaşanmasını engellemesi

2.8 Vuosaari B Santralı Isı Depolama Sistemi

Vuosaari B Santralı 463 (2x159 MW_e+145 MW_e) MW_e elektrik üretimi ve 416 MW_t ısı üretimi yapan doğalgaz kombine çevrim BIG santralıdır. Santralda 42 m yükseklik ve 29 m çapa sahip 26.000 m³ hacimli ısı depolama tankına sahip ve yükleme-boşaltma gücü 130 MJ/s olan bir IDS bulunmaktadır (Şekil 2.8) [13].



Şekil 2.7: Linz Mitte BIG Santrali Isı Depolama Sistemi [12]

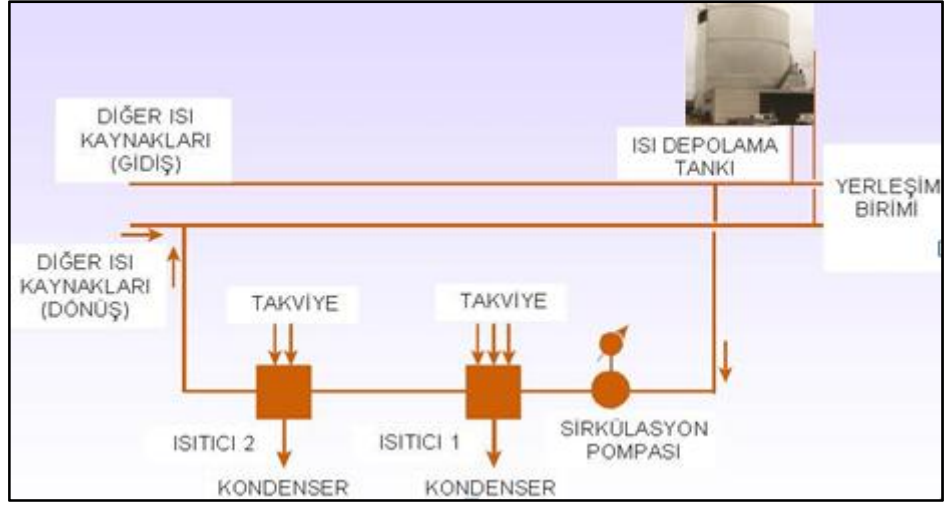


Şekil 2.8: Vuosaari B Santrali Buhar Akış Diyagramı [13]

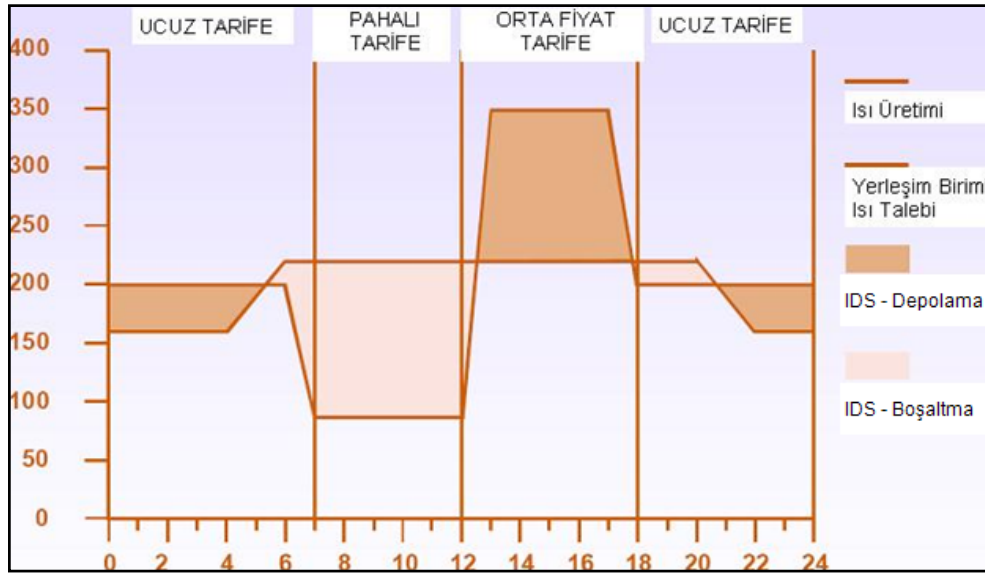
2.9 Nordjyllandsværket Santrali Isı Depolama Sistemi

BIS iletim hattında 110 °C gidiş ve 48 °C dönüş sıcaklıkları bulunmaktadır. Santral ısı üretim miktarı en yüksek 447 MJ/s'dir. Santralda, 12 saat aralıksız yerleşim birimine ısı tedarikini sağlayacak 25.000 m³ hacimli IDS bulunmaktadır. IDS'deki ısı

depolama tankı 31,3 m çap ve 33,6 m yüksekliğe sahiptir. IDS, elektrik birim fiyatının farklılık gösterdiği farklı tarife uygulamasında; tarifenin ucuz olduğu anda yükleme, tarifenin pahalı olduğu anda da boşaltılarak kullanılmaktadır (Şekil 2.10) [14].



Şekil 2.9: Nordjyllandsværket Santralı IDS [14]



Şekil 2.10: Farklı Tarife Zaman Dilimlerinde IDS Kullanımı [14]

2.10 Isı Depolama Sistemlerine Örnekler - Sonuç

Dünyadaki ısı depolama sistemlerinden örnekler bu bölümde verilmiştir. Her IDS uygulamasında görüldüğü gibi her tasarım kurulduğu BIS'in sağladığı tasarım girdilerine göre farklılık göstermektedir. Sonuç olarak, IDS tasarımı yapılırken, kurulacağı BIS göz önünde bulundurularak tasarım yönteminin nasıl olması gerektiği tasarım etkenleri incelenerek belirlenmelidir.

3. ISI DEPOLAMA SİSTEMİ TASARIMINA ETKİ EDEN ETKENLER

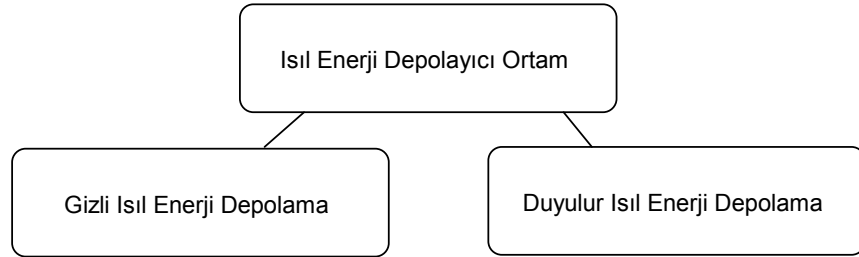
Isı depolama sistemleri konut içi ısı depolama, güneş enerjisinin depolanması vb. pek çok türde kullanılmaktadır. Tasarım yöntemini belirlemek için IDS'nin uygulama alanının belirlenmesi gerektiği gibi ayrıca uygulama alanına uygun olarak belirlenecek sistemin boyutlandırmasında yardımcı olacak tasarım etkenlerinin belirlenmesi de gerekmektedir. Ayrıca BIS için uygun tasarım yönteminin belirlendiği IDS'de BIS'in sağladığı tasarım girdilerine göre IDT'yi şekillendirecek tasarım etkenleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu bölümde dünyadaki uygulamalar göz önünde bulundurularak BIS'a kurulacak bir IDS'nin tasarımına yön veren, IDT'nin boyutlandırmasını etkileyecek ve IDS tasarımında dikkat edilmesi gereken etkenler anlatılmıştır.

3.1 IDS Tasarımını Belirleyen Etkenler

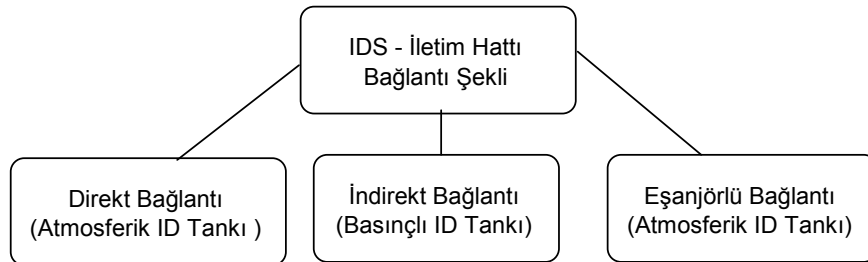
Bu bölümde anlatılacak, IDS'nin tasarım yöntemini belirleyecek etkenler şunlardır:

- Isıl enerji depolayıcı ortamın belirlenmesi (Şekil 3.1)



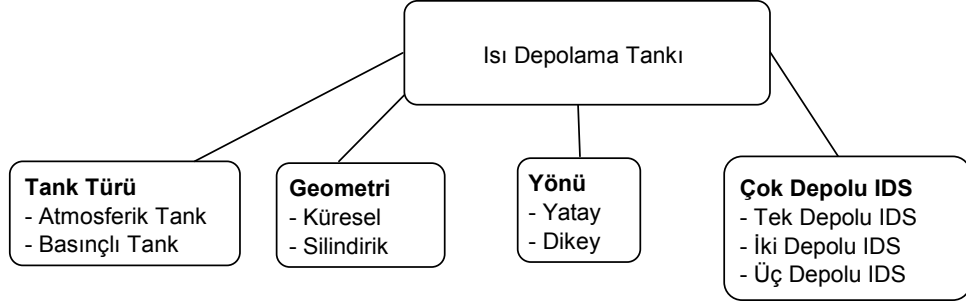
Şekil 3.1: Isıl Enerji Depolayıcı Ortamın Belirlenmesi

- IDS'nin BIS iletim hattına bağlantı şekli (Şekil 3.2)



Şekil 3.2: IDS'nin BIS İletim Hattına Bağlantı Şekli

- IDT tasarım seçim kriterleri (Şekil 3.3)



Şekil 3.3: IDT Tasarım Seçim Kriterleri

Bu etkenlere göre belirlenen IDS tasarımının yükleme - boşaltma verimliliğini belirleyen sıcaklık katmanlaşması, yayıcı ve ısı depolama tankı içerisindeki su ortamının yükseklik/çap oranı alt bölümlerinde ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

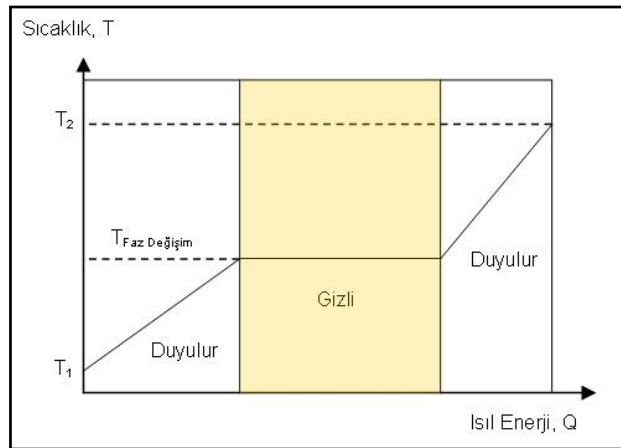
3.1.1 Isıl enerji depolayıcı ortam

Isıl enerjinin depolanması pekçok türde yapılabilmektedir. Isıl enerjiyi depolayıcı akışkanda faz değişimi olmaksızın sıcaklık değişimiyle enerji depolanıyorsa Duyulur Isı Enerjisi Depolama (Sensible Heat Storage), faz değişimi sağlanarak enerji depolanıyorsa Gizli Isı Enerjisi Depolama (Latent Heat Storage) gerçekleşmektedir (Şekil 3.4).

Duyulur ve gizli ısı enerji depolama yöntemlerinden hangisinin seçileceği, ısıyı depolama süresine, ekonomikliğe, işletme şartlarına bağlıdır [3]. Gizli ısı enerji depolama sistemlerinin duyulur ısı depolama sistemlerine göre avantajı düşük hacimde daha yüksek ısı depolama kapasitesine imkan vermesidir. Bu özelliğinden dolayı gizli ısı enerji depolama sistemleri daha çok yer sıkıntısının yaşandığı 'ev içinde kullanım' gibi uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, gizli ısı enerji depolama sistemi yükleme - boşaltma anında eşısı (izotermal) davranış göstermektedir. Her ne kadar gizli ısı enerji depolama sistemleri arzu edilen özelliklere sahip olsa da ticari amaçlı kullanımda duyulur ısı depolama sistemleri kadar yaygın kullanılmamaktadır. Çünkü boşaltma anındaki faz değişim anında taşınımın gerçekleştiği yüzeyden katı - sıvı ara yüzeyi uzaklaşmaktadır ve bu yüzden ısının transferi zayıf bir şekilde gerçekleşmektedir [15].

Gizli ısı enerji depolamasında kullanılan maddeleri şu şekilde gruplayabiliriz: Organik faz değişim maddeleri (OFDM), inorganik faz değişim maddeleri (İFDM) ve ötektik faz değişim maddeleri (ÖFDM). Gizli ısı enerji depolamasındaki diğer dezavantajları her bir faz değişim maddesi için sıralamak gerekirse:

- Organik faz değişim maddeleri (OFDM) katı fazında düşük ısı transfer özelliğine sahiptirler ve bu yüzden katılaşma anında yüksek ısı transfer miktarı gerekmektedir. OFDM yanıcıdır ve bu yanıcı özelliklerine karşı koruyucu engel olarak uygun muhafaza kabı tasarlanmalıdır. Maliyet göz önünde bulundurulduğunda ise sadece rafine edilmiş petrol ürünü parafin karışımlarının kullanılmasının getirdiğı kısıt bulunmaktadır.
- İnorganik faz değişim maddelerinin (İFDM) kullarımdaki dezavantajlar ise yükleme – boşaltma anında hacim değişiminin çok fazla olmasıdır. Ayrıca katı – sıvı faz değişiminde hızlı soğuma büyük sorun oluşturmaktadır. Faz değişiminin gerçekleşmesinde çekirdeklemeye yardımcı maddelerin (nucleating agents) yardımı gerekmektedir ve tekrarlanan yükleme – boşaltma süreçlerinden sonra yenilenmeleri gerekmektedir.
- Organik ve inorganik faz değişim maddelerinin karışımından oluşan ötektik faz değişim maddelerinin (ÖFDM) kullarımında ise yeni teknoloji olduğundan dolayı data eksikliği bulunmaktadır [16].



Şekil 3.4: Gizli – Duyulur Isıl Enerjisi Depolama Farkı

Yukarıda sayılan gizli ısı enerji depolama sistemlerindeki dezavantajlara göre, uzun yıllar üzerinde araştırma yapılan ve uygulamalarda bulunulan duyulur ısı depolama sistemlerinin yapılan tasarımlarda incelenmesi mantıklı görülmüştür. Duyulur ısı enerjisi depolama türünde yaygın olarak kaya, tuğla, yağ veya su depolama amaçlı olarak kullanılmaktadır. Kaya, tuğla,.. gibi katı depolayıcı ortamlara göre suyun özgül ısısı düşük olmasına rağmen su, akışkan olmanın avantajına sahiptir. Akışkan olarak su pompalama vasıtasıyla ısı enerjisi taşıyabilir ve ısıyı taşıma özelliğı katı depolama ortamlarına göre daha yüksektir [3].

Duyulur ısı enerji depolama sistemlerinde ısı enerji depolayıcı akışkan olarak farklı akışkanlar da kullanılabilir. Isıl enerji depolayıcı akışkanın seçimi yapılırken

akışkan maddenin özgül ısısı, yoğunluğu, toksikliği, korozyon dirençliliği ve maliyet etkenleri, çalışma sıcaklığı göz önünde bulundurularak incelenmelidir. Dünyadaki mevcut ısı depolama sistemleri uygulamaları incelenirse suyun ısı depolayıcı akışkan olarak kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, su toksik değildir, yüksek özgül ısıya sahiptir, pahalı değildir ve sıvı-buhar faz değişim sıcaklığı konut ısıtmasında ve sıcak kullanım suyu için uygun mertebededir. Birçok enerji sisteminde akışkan madde olarak suyun kullanılmasından dolayı depolayıcı akışkan olarak suyun kullanılması doğal bir davranış olmaktadır.

Isıl enerji depolayıcı akışkan olarak su kullanılmasıyla soğuk havalarda suyun donması ve depo ve borularda korozyonun gerçekleşmesi gibi problemler gerçekleşebilir. Bu problemler, sırasıyla depoya antifiriz eklenerek ve depoyu iç tarafından yalıtarak veya korozyon önleyici maddeleri suya karıştırarak önlenabilmektedir [2, 3, 7].

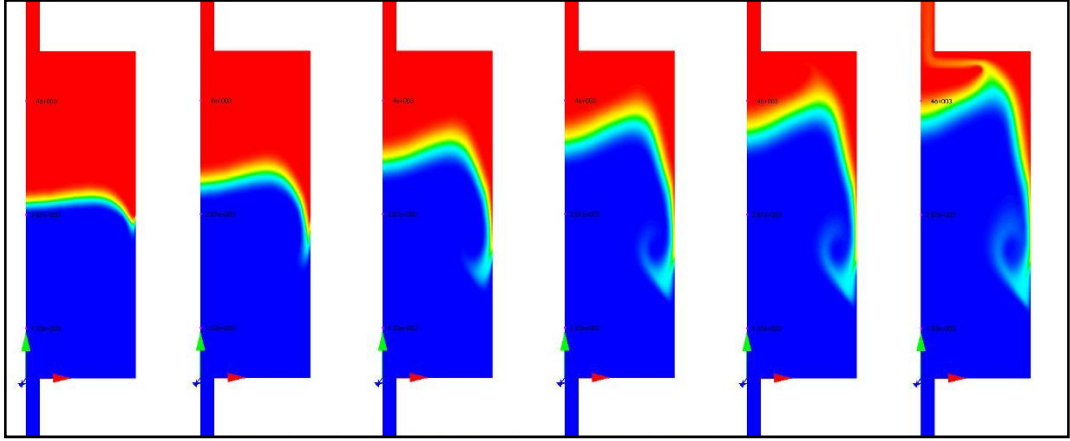
Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı tasarım, ısıl enerji depolayıcı akışkanın su olduğu sıcaklık katmanlaşmalı duyulur ısı depolama sistemine göre yapılmıştır. Sıcaklık katmanlaşmalı duyulur ısı depolama sistemi hakkında açıklayıcı bilgi alt paragraflarda verilmiştir.

Su ısındıkça, yoğunluğu azalmaktadır ve böylelikle sıcak su, fiziksel özelliğinden gelen doğal davranışla nispeten soğuk suyun üstündeki katmanlarda yerini kendiliğinden bulur. Sıcaklıkları doğrultusunda su hacimlerinin konumunu bulmaları ile sıcaklık katmanlaşması oluşmaktadır. Suyun yoğunluğu ve ısıl genleşme katsayısından dolayı ısı yayımının yüksek olması ısı katmanlaşmasının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Isıl enerji depolayıcı su ortamının optimum şekilde kullanılmasında sıcaklık katmanlaşmasının büyük bir payı vardır. Ancak, su ortamında iyi bir sıcaklık katmanlaşmasının oluşması kolay değildir. Bir 'ısıl veya akış etki' sıcaklık katmanlaşmasını sağlarken diğer bir 'ısıl veya akış etkisi' sıcaklık katmanlaşmasında karışım gibi bozucu etki yapabilmektedir, bu yüzden sıcaklık katmanlaşmasının sağlanması için tüm ısıl ve akış etkilerinin sıcaklık katmanlaşmasını sağlayacak şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Isı depolama tankı içindeki farklı sıcaklıktaki suyun karışımı yayıcıların (Bakınız: Bölüm 3.1.4) dikkatli tasarımı ile önlenabilir. Şekil 3.5'te boşaltma anında, ısı depolama tankı içerisindeki su ortamındaki sıcaklık katmanlarının zaman içindeki sıcaklık değişimi görülmektedir (soldan sağa zaman artmaktadır) [1, 17, 18].

Isı depolama tankı içindeki farklı sıcaklıkları ayırmanın bir diğer yolu ise ayırıcı zar malzemenin kullanılmasıdır. Ayırıcı zar malzeme farklı sıcaklıktaki suyun birbirine

karişmamasına yardımcı olsa da zar malzemenin bakım ihtiyacının, dayanıklılığının ve maliyetinin yüksek olmasından dolayı bu uygulama tercih edilmemektedir.

Bir diğer uygulama da suyun akışının zorlandığı labirentli iç yapıya sahip ısı depolama sistemleridir. Sıcak ve düşük sıcaklıktaki suyu birbirinden ayırmada faydalı olan bu uygulamanın dezavantajı, ard arda yapılan deneylerde ısı depolama tankı boşaltma verimliliğinde düşüşün olmasıdır [3].



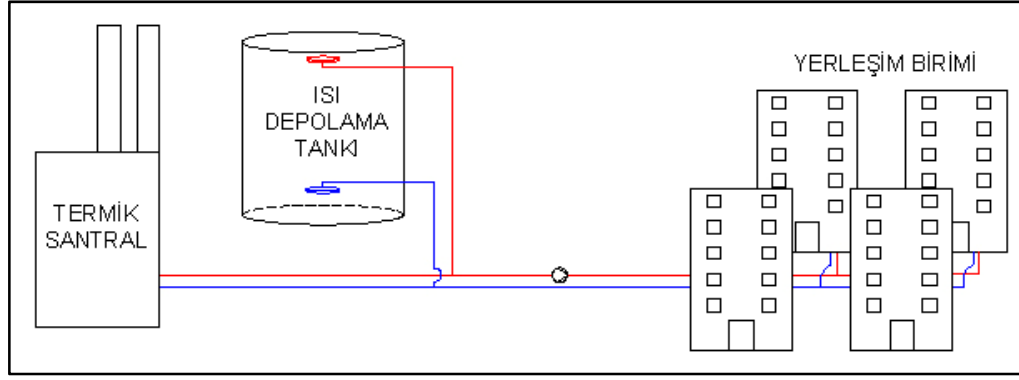
şekil 3.5: Sıcaklık Katmanlaşmalı IDS [4]

3.1.2 İletim hattına bağlantı şekli

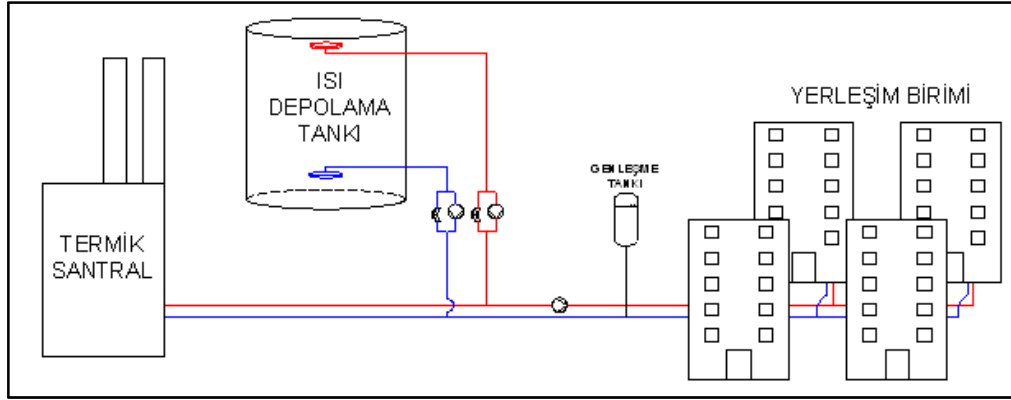
IDS mevcut sistemler göz önünde bulundurulduğunda üç farklı şekilde iletim hattına bağlanmaktadır. Depo iletim hattına atmosferik tank olarak direkt bağlanabileceği gibi pompa ve vana sistemlerinin kullanılarak iletim hattından ayrıldığı basınçlı tank olarak bağlanabilmektedir. Diğer bir uygulama ise IDS'yi iletim hattından ayıran bir ısı değiştiricisinin bulunduğu durumdur. Bu şekilde ısı depolama tankı atmosferik olarak tasarlanabilmektedir.

Atmosferik ısı depolama tankı şekil 3.6'da gösterildiği gibi BIG santralı ile dağıtım hattı arasına konumlandırılır. Atmosferik ısı depolama tankı genleşme deposu görevi gördüğünden dolayı iletim hattında ek bir genleşme deposu yoktur.

İletim hattı statik basıncı IDT'nin içerisindeki suyun hidrostatik basıncından yüksekse, iletim hattının konumlandırıldığı yerel coğrafik koşullar IDT'nin yüksekliğinde kısıtlama oluşturuyorsa veya depo basınçlı kap olarak tasarlanmışsa; deponun iletim hattından hidrolik sistemle ayrılması mümkündür. IDT'nin iletim hattından hidrolik sistemle ayrıldığı durumda yükleme ve boşaltma, depo giriş çıkış boruları üzerinde bulunan çift kontrol vanaları ve pompalar vasıtası ile belirlenir (şekil 3.7) [2].

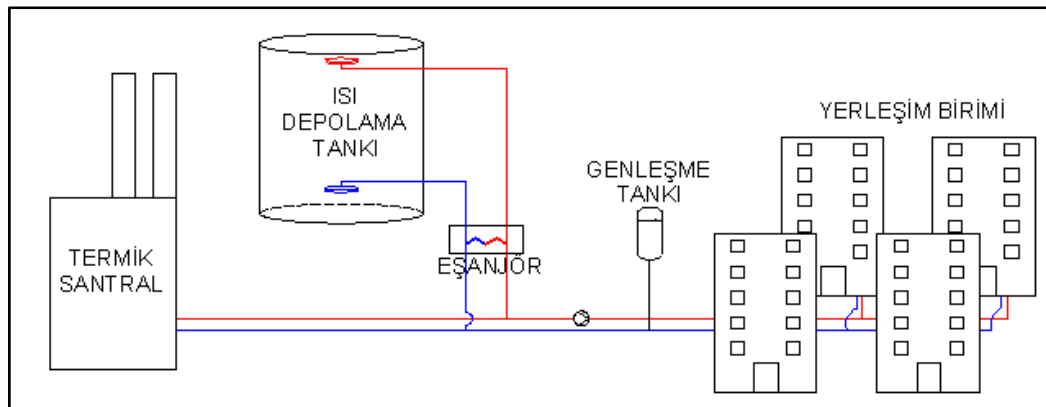


Şekil 3.6: Direkt Bağlantı - Atmosferik IDT [4]



Şekil 3.7: İndirekt Bağlantı - Basıncılı IDT [4]

Diğer bir uygulama ise IDS'yi iletim hattından ayıran bir ısı değiştiricisinin bulunduğu durumdur (Şekil 3.8). Bu şekilde ısı depolama tankı atmosferik olarak tasarlanabilmektedir ve coğrafik koşullardan dolayı iletim hattı statik basıncının IDT'nin yüksekliğinin belirlenmesinde etkili olmamaktadır.



Şekil 3.8: Eşanjörlü Bağlantı – Atmosferik IDT [4]

3.1.1 Isı depolama tankı

Isı depolama tankı (IDT), iletim hattı koşullarına göre, IDS'nin verimliliğini belirlemek açısından ve konumlandırılacağı yerin tanıdığı imkanlar veya üretim kısıtlarına göre belirlenmelidir.

3.1.1.1 Isı depolama tankı türü

IDS, BIG santralından yerleşim birimine sıcak suyun aktarıldığı iletim hattına bağlanır. IDT'nin atmosferik ya da basınçlı olarak tasarlanmasında iletim hattında taşınan suyun sıcaklığı ve statik basıncı beraber etkili olmaktadır. İletim hattı statik basıncının 7 bar civarında olduğu ve iletim hattı gidiş su sıcaklığının 100 °C'nin altında olduğu sistemlerde IDT'nin atmosferik olarak tasarlanması gerekmektedir. İletim hattı gidiş su sıcaklığının 100 °C'nin üstünde olduğu sıcaklıklarda IDT'nin basınçlı olarak tasarlanması gerekmektedir.

BIS iletim hattı şartları deponun atmosferik olmasını gerektiriyorsa deponun tasarlanmasında dikey petrol veya su depolama tanklarının standartları kullanılabilir. İletim hattı, IDT'nin basınçlı kap olarak tasarlanmasını gerektiriyorsa deponun boyutlandırması basınçlı kap hesaplamaları referans alınarak yapılmalıdır [2].

3.1.1.1 Isı depolama tankı geometrisi

Alan/hacim oranını küçültmek için IDT geometrisinin en uygun küresel olarak tasarlanması gerekmektedir. Hem üretim hem de işletim açısından beraber ele alındığında IDT'nin geometrisinin silindirik olması tercih edilir.

3.1.1.2 Yükseklik/Çap oranı (H/D)

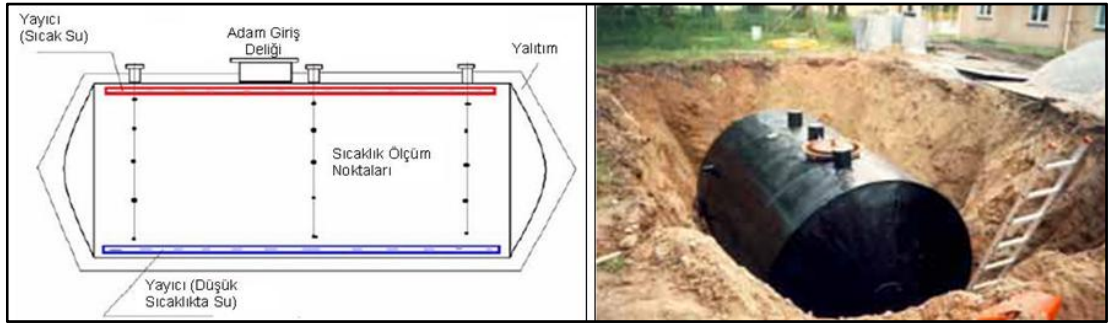
Silindirik geometri tercih edildiğinde alan/hacim oranını küçültmek için yükseklik çap oranı (H/D) 1:1 olarak seçilebilir. İşletim ve görsel açıdan ele alındığında yükseklik-çap oranının 2:1'e yakın seçilmesi uygun olmaktadır. IDT içinde ayırıcı sıcaklık katmanının kalınlığı sabit olmaya eğilimlidir. Yükseklik-çap oranının yüksek olduğu uzun depoda ayırıcı sıcaklık katman hacmi yükseklik-çap oranının düşük olduğu enine geniş depodaki ayırıcı sıcaklık katman hacmine göre nispeten düşük değerde olacaktır. Böylelikle sabit hacimdeki depolayıcı akışkanda daha çok ısı enerjisi depolanabilecektir [1]. Kjær & Aagaard, ayırıcı sıcaklık katman hacminin düşük hacimde olması için normal şartlarda 1,5 değerinden daha büyük yükseklik-çap oranı (H/D) tercih edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Eğer IDT'nin alt ve üst bölümünde

birden çok yayıcı kullanılıyorsa 0,8 değerine kadar düşük yükseklik çap oranı (H/D) kullanılabilir [2].

3.1.1.3 Isı depolama tankı konumu

IDT yatay veya dikey olarak kurulabilir. Isıl enerji depolama verimliliği ele alındığında dikey depo kullanılması en iyisidir. Eğer IDT'nin kurulumunda yer sıkıntısı varsa veya deponun dikey olarak imal edilmesi imkânsızsa IDS yatay olarak tasarlanmalıdır.

Eğer IDT yatay olarak tasarlanacaksa yayıcı olarak üzerinde çoklu deliklerin açıldığı uzun boruların kullanılması gerekmektedir (Şekil 3.9) [1].



Şekil 3.9: Yatay IDT [1]

3.1.1.4 Çoklu depolu ısı depolama sistemi

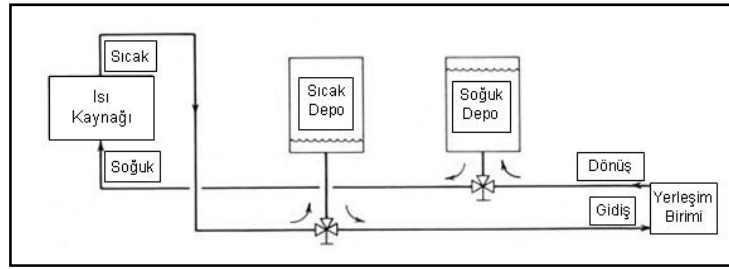
IDT'nin yerleştirilmesindeki kanunsal kısıtlamalarından dolayı veya ihtiyaç duyulan durumlarda IDS'de çoklu ısı depolama tankları kullanılmaktadır. Hem yatay hem dikey olarak uygulanabilen çoklu ısı depolama tankları seri veya paralel olarak birbirine bağlanabilmektedir. Diğer bir uygulama ise çoklu ısı depolama tanklarının birbirinden bağımsız olarak kullanılmasıdır.

Isı depolama tanklarının paralel bağlandığı sistemlerde IDS'ne gelen sıcak veya düşük sıcaklıktaki su depolara bölüştürülür ve giriş-çıkış su hızları azaldığından depoda sıcaklık katmanlaşmasının bozulması daha az olur. Paralel bağlı ısı depolama tanklarında her iki depoda da aynı koşulların sağlanması zordur. Belirli zaman sonra paralel bağlı ısı depolama tanklarındaki ayırıcı sıcaklık katmanı farklı konumda olmaktadır. Bu farklılaşmadan dolayı boşaltma ve yüklemenin etkin olması için ısı depolama tanklarının tam dolu veya tam boş hale getirilip paralel özelliklere sahip olmaları sağlanır. Eğer ısı depolama tankları paralel özelliklere getirilmezlerse sıcaklık katmanlaşması her iki sistemde ayrı olacaktır. Bu farklılık boşaltma

sıcaklığında düşüş sağlayacağından sistemin genel kapasitesinde azalma gerçekleşecektir.

Isı depolama tanklarının seri bağlandığı sistemlerde depo giriş-çıkış su hızları paralel bağlı sistemlere göre nispeten hızlı olmaktadır. Bu sistemin paralel bağlı sisteme göre avantajı ise tek ısı ayırıcı tabakanın oluşmasıdır [1].

Isı depolama tanklarının birbirinden bağımsız olarak kullanıldığı durumda ısı depolama tanklarından birisi düşük sıcaklıktaki su ile doluyken diğeri sıcak su ile dolu olmaktadır. Tam yükteki depo sisteme depoladığı ısı enerjisi verirken diğeri boş olan depoya yerleşim biriminden dönen düşük sıcaklıktaki su dolmaktadır. Tam yükteki depo boşaldığında diğeri depo bu sefer yerleşim biriminden dönen düşük sıcaklıktaki su ile tam dolu hale gelmektedir. IDS tekrar yüklenmek istendiğinde boş olan depoya santraldan sağlanan sıcak su dolmaktadır ve eş zamanlı olarak diğeri düşük sıcaklıktaki suyla dolu olan depo boşaltılmaktadır (Şekil 3.10) [3].

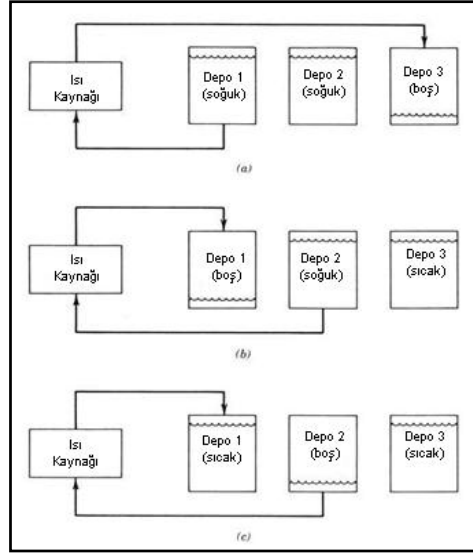


Şekil 3.10: Seri Bağlı İki Depolu IDS [8]

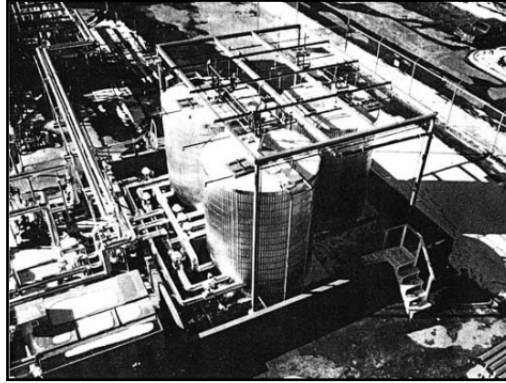
Bağımsız çoklu depolu IDS’de diğeri bir uygulama ise üçlü IDT’nin kullanıldığı ısı depolama sistemleridir. Üçlü depolu sistemin tam yükte olmadığı durumda 1. ve 2. depolar boş bulunmaktadır (Şekil 3.11-a). Birinci yükleme işlemine başlandığında düşük sıcaklıktaki su 1. depodan alınırken, sıcak su boş olan 3. depoya beslenmektedir. 3. depo sıcak su ile dolduktan sonra birinci yükleme işlemi tamamlanır (Şekil 3.11-b). Daha sonraki bir aşamada veya birinci yükleme işlemine devam edilerek, düşük sıcaklıktaki su 2. depodan alınırken sıcak su boş olan 1. depoya beslenmektedir. Sonuç olarak IDS tam yükte olacaktır (Şekil 3.11-c).

Üç depolu IDS avantajı, aynı ısı kapasite ele alındığında, iki depolu ısı depolama sistemindeki boyutlara göre daha küçük boyutta depoların kullanılmasıdır. İki depodan fazla deponun kullanıldığı IDS, iki depolu IDS’ne göre nispeten düşük maliyetle olmaktadır. Daha çok deponun ısı depolama sisteminde kullanılıp sistemin daha ucuza gelmesini kısıtlayan etkenler bulunmaktadır. Bu etkenler; kontrol sisteminin karmaşılaşması, depoların birbirine bağlanması ve bu bağlantılarda otomatik vanaların kullanımının maliyeti artırması ve ısı kayıplarının olmasıdır (Sandia

National Laboratuvarları, Şekil 3.12). Büyük boyutlu depolarda, küçük boyutlu depolara göre hacim başına daha az ısı kaybı gerçekleşmektedir. Ayrıca depolar arasındaki bağlantılar daha çok ısı kaybı gerçekleşmesine imkan tanımaktadır [8].



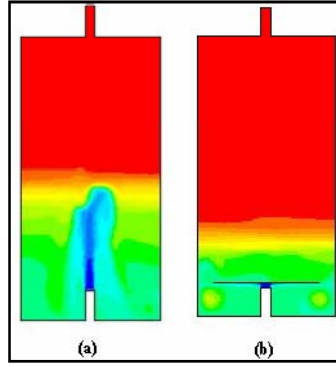
Şekil 3.11: Seri Bağlı Üç Depolu IDS [8]



Şekil 3.12: Üç Depolu IDS [8]

3.1.2 Yayıcı

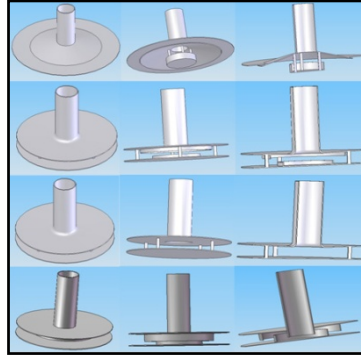
IDT'de sıcak su ile düşük sıcaklıktaki su arasında iyi bir sıcaklık katmanlaşmasının sağlanması ve farklı sıcaklıktaki suyun birbirine karışmaması için IDT'nin alt ve üst giriş-çıkış noktalarında yayıcılar kullanılır (Şekil 3.13). Yayıcı tasarımında depoya su giriş-çıkış yönlerinin simetrik, hızların da olabildiğince düşük olmasına özen gösterilmelidir [1]. Tasarıma göre değişiklik gösterse de yayıcı depo giriş-çıkış su hızları 0,02 – 0.2 m/s. arasında bir hızda seçilebilir [2].



Şekil 3.13: Yayıcının Sıcaklık Katmanlaşmasına Katkısı [4]

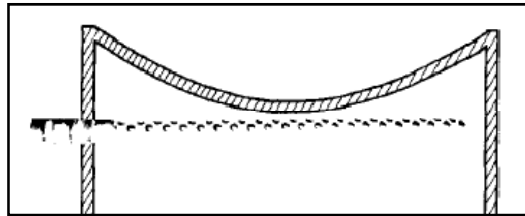
Aşağıda, Isı Depolama Sistemlerinde kullanılan yayıcılara örnekler gösterilmiştir.

- IDS’de kullanılabilecek çeşitli yayıcı tipleri Şekil 3.14’te görülmektedir.



Şekil 3.14: Çeşitli Yayıcı Tipleri [4]

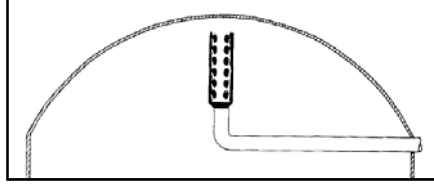
- Ters yarımküresel başlıklı 300 litre hacimli IDT’de 2,22 cm çapında 40,64 cm uzunluğunda ve üstünde kırksekiz tane delik açılmış yayıcı örneği görülmektedir. (Şekil 3.15) Yayıcı deponun üst başlığına olabildiğince yakın olarak yatay şekilde yerleştirilmiştir. Kırk sekiz delik boru boyunca iki birbirine yakın aksenal çizgi üstüne açılmıştır ve yayıcının son ucu kapatılmıştır. Yayıcı üstündeki delikler deponun üst başlığına doğru yönelmiştir [17].



Şekil 3.15: Yatay Yayıcı Örneği [17]

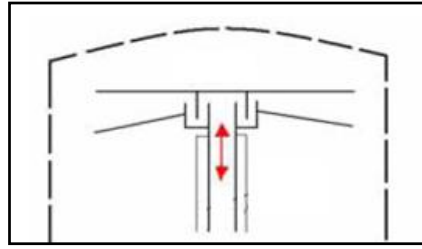
- Yarımküresel başlıklı 1.900 litre hacimli IDT ‘de 15,24 cm uzunluğunda, 5,08 cm çapında ve 1,27 cm et kalınlığına sahip bir dikey yayıcı kullanılmıştır. Yayıcı üstüne, depo başlığına yönlendirecek şekilde 1,27 cm çapında 45° açıyla 1,27 cm çaplık otuz altı tane delik açılmıştır (Şekil 3.16). Depoya giren veya depodan

ıkan su, depo son yüzeylerine ynlenererek en az karışımın olması ve akışta durgunluk sağlanmaktadır [17].



şekil 3.16: Dikey Yayıcı rneği [17]

- IDT giriş-çıkış hızlarının düşük olmasını sağlayacak bir yayıcı rneği şekil 3.17’de gösterilmektedir.



şekil 3.17: Su Hızlarını Düşürücü Dikey Yayıcı rneği [1]

3.2 IDS’i Koruyucu Diğer Etkenler

IDT’nin boşaltma verimliliğini arttırıcı etkenlerin dışında deponun ve yalıtımın korunmasını sağlayan etkenler bulunmaktadır. Alt başlıklarda bu etkenler hakkında bilgi verilmiştir.

3.2.1 Yalıtım

Yalıtım, IDT’de depolanan ısı enerjisinin muhafaza edeceği süreyi belirlemektedir. IDS kullanım yöntemi günlük, haftalık vb. zaman dilimleri için belirlenebilmektedir. Kullanım yöntemi belirlendikten sonra IDT’nin ısı depolama süresi göz önünde bulundurularak yalıtım kalınlığının belirlenmesi gerekmektedir.

3.2.2 Korozyondan korunma

BIS sisteminde düşük oksijen içeren su kalitesi sağlandığında deponun suyla temas eden bölümlerinde normal şartlarda korozyon görülmez [2]. Fakat depolama amaçlı olarak işlenmiş su kullanılsa bile korozyon problemi ile karşılaşmamak için IDT’nin i yüzeyinin kaplanması gerekmektedir. IDT içindeki ısı değişkenlikten dolayı özellikle deponun en st bölümlerinde kaplama metal yüzeyden kalkabilmektedir [1].

IDT’nin alt bölümlerinde korozyon ihtimali söz konusu olduğundan dolayı büyük boyutlu ısı depolama tanklarında kamera kullanımına veya denetleme ve tamir

ekibinin depo iç bölmesine girmesine imkan tanıyacak adam giriş deliğinin olmasına tasarım aşamasında dikkat edilmelidir.

IDT içinde korozyonu denetlemenin yolu depo içerisine tellerle metal paręalar sarkıtılıp belirli aralıklarda bu metal paręaların kontrol edilmesiyle geręekleřir. Fakat tek başına metal paręalarla denetimin yapılması depo içerisinde korozyonun olmasına karşı uyarı göstermemektedir [1].



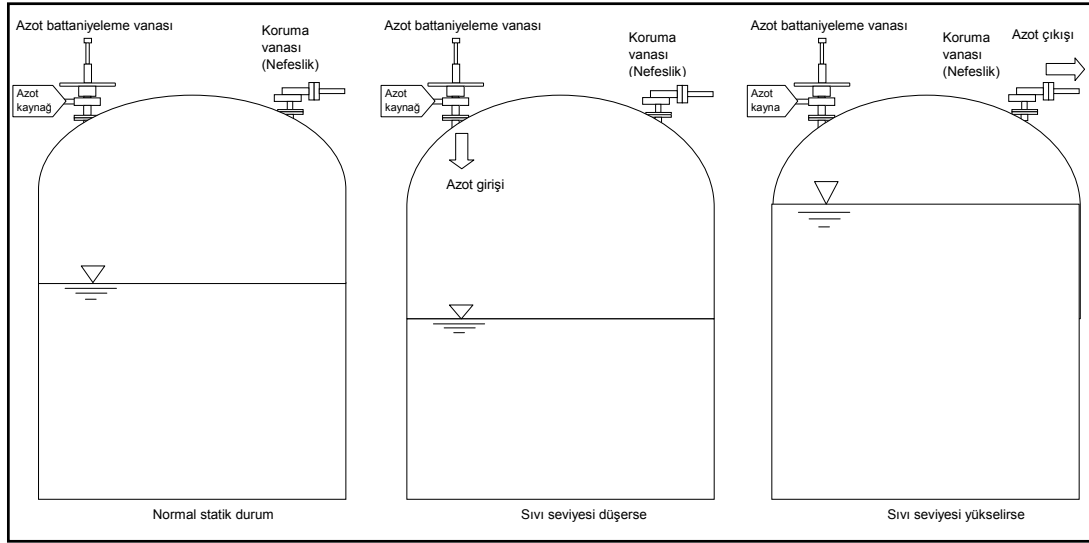
şekil 3.18: IDT’de Görülen ęeřitli Korozyon Örnekleri [1]

IDT’nin suyla temas etmeyen üst bölmesinin havadaki oksijen ve su buharıyla temas etmesi ile oluşabilecek korozyondan korunması için etkisiz bir buhar veya azot tabakası bu bölümde oluşturulur [5]. Buhar tabakanın ęökme ihtimali olup hava/oksijen’in depo üst bölmesine girebilme ihtimalinin var olmasından dolayı birçok BIG santralında azot tabakası tercih edilmektedir. Azot tabakanın oluşturulmasının diğer bir adı da battaniyeleme olarak da geğmektedir. Battaniyeleme uygulanmış tankların boşaltılması ya da doldurulması sırasında, hassas bir basınę kontrol sistemi sayesinde sıvının üzerinde hep aynı basınęta azot kalması sağlanır. Battaniyeleme sisteminin ana elemanları; azot gazı ve kaynağı, azot battaniyeleme vanası ve tank koruma vanasından (nefeslik) oluşmaktadır.

Azot genellikle dikişsiz ęelik ęekme tüplerde belli bir basınęta depolanan azot kaynağından IDT’e tedarik edilir. Burada, tüp içindeki azot basıncındaki azotun istenilen basınęta IDT’e verilebilmesi azot battaniyeleme vanası ile yapılmaktadır.

Azot battaniyeleme vanası, azot kaynağından (üreteğ, tüp, tank vs.) gelen azotun basıncını istenilen ayar basınę seviyelerine düşürür. Bu basınę seviyesi milibar seviyesinde dahi olabilir. IDT ęalıřması sırasında tank içindeki suyun sıcaklığı sürekli olarak değişmektedir. Suyun farklı sıcaklıklarda farklı birim hacme sahip olmasından dolayı da suyun seviyesinde yükselmeler ve alęalmalar olacaktır. Sonuç olarak da suyun üzerindeki boşluktaki hacim sürekli azalacak veya artacaktır. Suyun sıcaklığının değişimi nedeniyle suyun seviyesindeki azalma boşluktaki azot gazının

basıncının düşmesine sebep olur. Bu durumda ise, azot battaniyeleme vanası, azot battaniyesinin basıncının ayar basınç değerinin altına düştüğü zaman tanka azot besleyerek basıncı korur.



Şekil 3.19: Battaniyeleme Sisteminin Çalışma Prensibi [4]

Battaniyeleme sisteminde kullanılan diğer bir eleman ise, tank koruma vanasıdır. Tank koruma vanası ise, tankı aşırı yüksek yüklemeye karşı korur. IDT'nin çalışması sırasında tankın sıvı seviyesinin yükselmesi sonucunda su üzerindeki hacim içinde azot gazı sıkışır ve basıncı artar. Bu durumda, boşluk içinde istediğimiz basıncın üzerine çıkan azot gazı basıncı tank koruma vanasının açılması ile ayar basıncına gelene kadar dışarı atılır [19].

3.2.3 Hava şartlarından korunma

Hava şartlarından IDT'nin korunması ucuz alüminyum kaplama ile sağlanabileceği gibi pahalı mimari tasarımlar da kullanılabilir. Koruma kaplamaları IDT'e hafif çelik yapılarla montaj edilebilir [2].

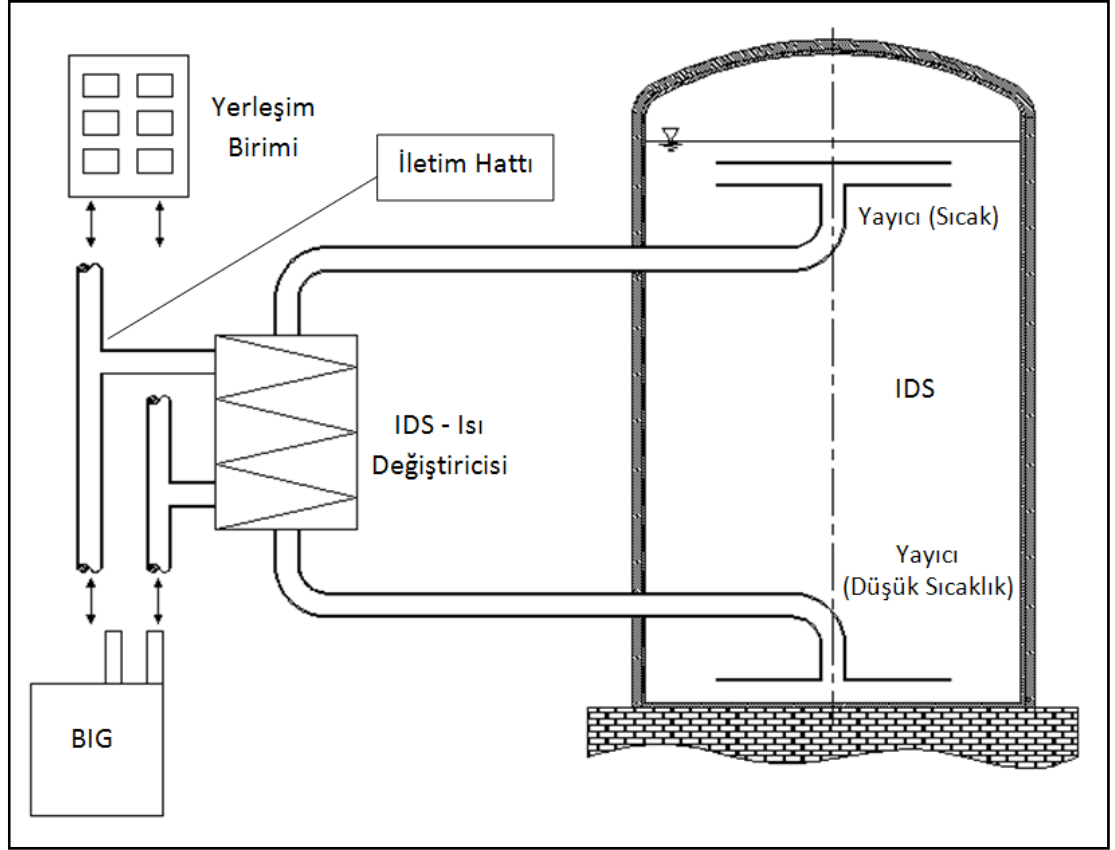
3.3 Isı Depolama Sistemi Tasarımına Etki Eden Etkenler - Sonuç

Yukarıda IDS'nin tasarım etkenleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Belirtilen bu etkenler göz önünde bulundurularak IDS tasarımının nasıl yapılması gerektiği belirlenmiştir (Tablo 3.1).

Bölüm 3.1.1'de belirtildiği gibi IDS tasarımının, avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurularak depolayıcı akışkanın su olduğu sıcaklık katmanlaşmalı duyulur IDS'ye göre yapılmasının uygun olduğu görülmüştür (Şekil 3.20).

Tablo 3.1: Tasarım Etkenleri Ve Yapılan Seçim

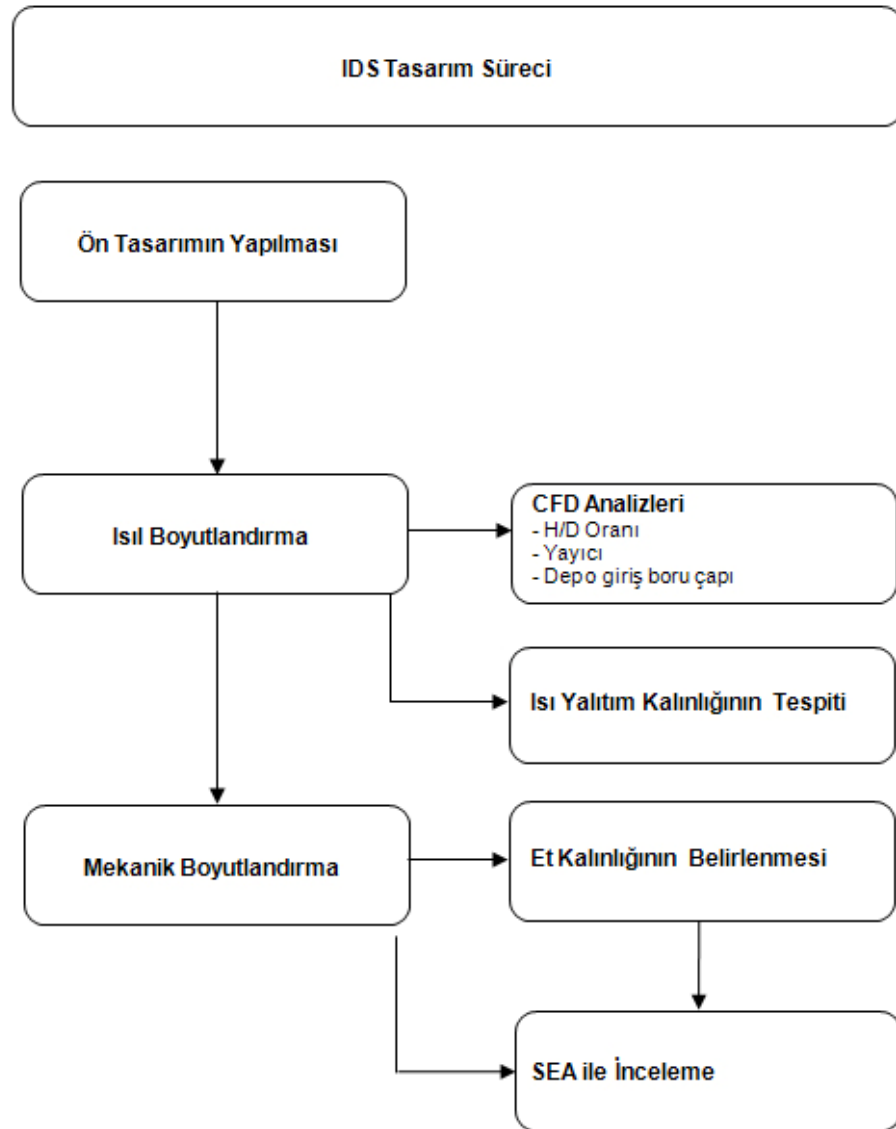
Tasarım Etkeni	Yapılan Seçim/Açıklama
Isıl Enerji Depolayıcı Ortam	Sıcaklık Katmanlaşmalı Duyulur IDS
Bağlantı Şekli	Eşanjörlü Bağlantı
Isı Depolama Tankı	Atmosferik Isı Depolama Tankı
Tank Türü	
Geometri	Silindirik Tank
Yönü	Dikey Depo
Tank Sayısı	Tek Depolu
Yayıcı	CFD Analizleri Sonucunda Belirlenecek
Yalıtım	Yalıtım Kalınlığı Hesaplamaları yapılacak



Şekil 3.20: Isı Depolama Tankı [4]

4. IDT'NİN ISIL ve MEKANİK BOYUTLANDIRILMASI

IDS'nin tasarımında su ortamının ısıl tasarıma göre boyutlandırması; ilk başta literatürden elde edilen veriler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir ve daha sonra CFD analizi yardımıyla IDS boşaltma verimliliği en yüksek olacak şekilde ısıl tasarım tamamlanmıştır. Daha sonra tasarım girdilerinde tanımlanan ısı kaybına izin verecek yalıtım kalınlığı belirlenmiştir. Isıl tasarım sonucu çıkan su ortamı boyutlandırmasına göre IDT'nin mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Tasarım Akış Şeması

4.1 Isı Depolama Sisteminin Isıl Tasarımı

IDS'nin ısı tasarımında öncelikle tasarım girdileri göz önünde bulundurularak ve bazı parametreler için literatür taramasından belirlenen değer aralıklarından bir değer kabulü yapılarak IDT'nin ön boyutlandırması yapılmıştır. Daha sonraki aşamalarda IDT'nin boşaltma verimliliğini belirleyen giriş ve çıkış boru çapı, ısı depolama tankı içerisindeki su ortamının yükseklik/çap oranı (H_s/D_s) ve yayıcı plaka çapı (D_y) gibi parametrelerin farklı boyutları için CFD analizleri yapılmıştır. Her bir parametre için boşaltma verimliliğini en yüksek yapacak şekilde boyut belirlenip IDT'nin son boyutlandırması gerçekleştirilmiştir.

4.1.1 Tasarım şartları

Deney amaçlı kullanılacak prototip IDT'nin tasarım şartları aşağıda maddeli şekilde verilmiştir:

- IDS çalışma sıcaklık rejimi 90 – 70 °C'dir.
- Isı depolama tankı ısı enerji depolama kapasitesi 1.600 MJ'dür.
- IDS'nin yükleme-boşaltma gücü 1 MW'tır.
- Dış ortam sıcaklığının -30 °C'de olduğu durumda depo yalıtımı 5 kW'lık ısı kaybına izin verecektir.
- Depolayıcı akışkan olarak su seçilmiştir. Depo içindeki akışı yönlendirecek yayıcının malzemesi çeliktir. Yayıcının ve ısı enerji depolayıcı akışkan suyun fiziksel özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Farklı Sıcaklıklarda Su Ve Çeliğin Fiziksel Özellikleri

Malzeme		90 °C su	70 °C su	Çelik
İletkenlik, k	(W/m.K)	0,6	0,0006	52
Özgül Isı, C_p ,	(J/kg.K)	4.182	4.182	465
Viskozite, μ ,	(Pa.s)	0,001003	0,001003	-
Yoğunluk, ρ ,	(kg/m ³)	965,3	977,7	7 833
Isıl Genleşme, β ,	(1/K)	0,0004	0,0004	0,0004

4.1.2 IDT'nin ön boyutlandırması

Bu bölümde literatürden edinilen bilgiler ve tasarım girdileri esas alınarak IDT'nin ön boyutlandırması yapılmıştır. Ön şekillendirme sürecinde tasarım girdileri olarak verilen ısı depolama kapasitesi ve ısı yükleme-boşaltma güç değerlerinin yardımıyla

deponun ön şekillendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Böylece, IDT'nin, sırasıyla, hacmi ve hacimsel debisi hesaplanmıştır. Depo boşaltma verimliliğini belirleyen etkenlerden bir tanesi ısı depolama tankı içerisindeki su ortamının yükseklik/çap oranıdır. Hesaplanan hacim değeri kullanılarak, kabul edilen belli bir su ortamı yükseklik/çap oranına göre IDT'nin su ortamının yükseklik ve çap değerleri hesaplanmıştır. Depoya giren ve çıkan boruların çapları ise belli bir akış hızı varsayımı ile daha önce hesaplanmış hacimsel debinin yardımıyla bulunmuştur. Böylece, IDT'nin ön boyutlandırması gerçekleştirilmiştir.

IDT'de depolayıcı akışkan olarak su kullanılmıştır. Suyun depolayacağı enerji miktarı denklem 4.1'de ifade edilmiştir. IDT içerisindeki ısı enerji depolayıcı akışkan olan suyun hacmi bu eşitlikten bulunmuştur.

$$Q_{IDT} = V_{DA} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

Burada;

V_{DA} : IDT içerisindeki su ortamı, m³

Q_{IDT} : IDT ısı depolama kapasitesi, Joule

C_p : Suyun özgül ısısı, kJ/kg. K

ΔT : IDT giriş-çıkış sıcaklık farkı, °C

ρ : Suyun yoğunluğu, kg/m³

1.600 MJ ısı kapasiteyi 90-70 °C çalışma rejiminde sağlamak için IDT içerisindeki ısı enerji depolayıcı akışkan olan suyun hacmi (V_{DA}) 19,70 m³ olarak belirlenmiştir.

IDT boşaltma verimliliğini ve ısı enerji depolayıcı akışkan hacminin birim hacimdeki alan oranını (A_{DA}/V_{DA}) belirleyen parametrelerden bir tanesi IDT içerisindeki su ortamının yükseklik/çap oranıdır (H_S/D_S). IDT içerisindeki su ortamının ana boyutlarını belirlemek için ön boyutlandırma kabulü olarak Kjær ve Aagaard'ın "Heat Accumulators" makalesinde önerilen $H_S/D_S = 1,5$ oranı kullanılmıştır [2]. Ön boyutlandırma sonucu olarak; Kabul edilen bu yükseklik/çap oranına göre depo içerisindeki su ortamının çapı $D_S = 2,56$ m, yüksekliği de $H_S = 3,83$ m olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu boyutlar CFD programında gerçekleştirilen benzeşimle gerçek değerlerine ulaştırılmıştır.

IDS'nin yükleme-boşaltma gücü ($\dot{Q}_{IDT}$) 1 MW'tır. 1.600 MJ ısı kapasitesinin 1 MW gücü sağlaması için 26,7 dakikada 0,0123 m³/s hacimsel debide ($\dot{V}$) boşaltması gerekmektedir.

$$\dot{V} = \frac{V_{DA}}{Q_{IDT}/\dot{Q}_{IDT}} \quad (4.2)$$

Ön boyutlandırma bölümünde yapılan hesaplamalara göre belirlenmiş IDT içerisindeki su ortamı ve boyutları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: IDT’nin Ön Tasarım Boyutları

	Hacim (V_{DA})	H_s/D_s	Çap, D_s	Yükseklik, H_s
Birim	m^3	-	m	m
Prototip IDS	19,70	1,5	2,56	3,83

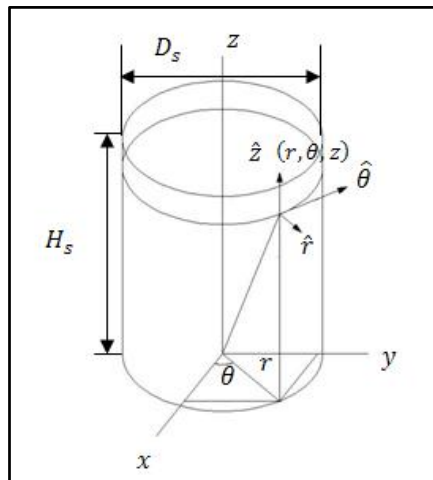
4.1.3 CFD analiz modeli, sınır koşulları, kabuller ve boşaltma verimliliği

Farklı birçok IDT çalışma şekli belirlenerek CFD analizi ile IDT boşaltma verimliliğini hesaplamak mümkündür. Bu çalışmada IDT’nin yarısı 90 °C, diğer yarısı ise 70 °C su ile dolu iken CFD analizleri yapılmıştır. Deponun boşaltılması esnasında 70 °C sıcaklıktaki su alt girişten depoya verilip, eş zamanlı olarak da 90 °C sıcaklıktaki su üst çıkıştan yerleşim birimine gönderilir.

Başlangıç model olarak depo içi su ortamı çapı 2.560 mm ve yüksekliği 3.830 mm olan modelin çözümü ele alınmıştır.

4.1.3.1 CFD modelinin tanımı

Enerji analizi, sisteme giren enerji ile sistemden çıkan enerjinin belirlenmesi için gereklidir. Depo içerisindeki sıcaklık dağılımı enerji dengesine göre değişkenlik göstermektedir. Enerji analizleri süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin depo geometrisi için sınır koşulları belirtilerek çözülmesiyle gerçekleştirilir. CFD analizleri gerçekleştirilirken genel halleri verilen bu üç denklem kullanılmıştır (Şekil 4.2) [20].



Şekil 4.2: IDT Su Ortamı

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot U_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right] = 0 \quad (4.3)$$

r- Momentum Denklemi

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot U_r \cdot U_r)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \cdot \frac{\partial(U_\theta \cdot U_r)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial(U_z \cdot U_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \cdot U_r)}{\partial r} \right) \right] \\ + \mu \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_r}{\partial \theta^2} + \mu \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} + \mu \left[-2 \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} \right] + \frac{\rho \cdot U_\theta^2}{r} + \rho \cdot g_r \cdot \beta \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (4.4)$$

θ - Momentum Denklemi

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U_\theta}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(r \cdot U_r \cdot U_r)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \cdot \frac{\partial(U_\theta \cdot U_\theta)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial(U_z \cdot U_\theta)}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \cdot U_\theta)}{\partial r} \right) \right] \\ + \mu \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial \theta^2} + \mu \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial z^2} + \mu \left[-\frac{2}{r^2} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} \right] - \frac{\rho \cdot U_r \cdot U_\theta}{r} + \rho \cdot g_\theta \cdot \beta \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (4.5)$$

z- Momentum Denklemi

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U_z}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(r \cdot U_r \cdot U_z)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \cdot \frac{\partial(U_\theta \cdot U_z)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial(U_z \cdot U_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \cdot U_z)}{\partial r} \right) \right] \\ + \mu \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_z}{\partial \theta^2} + \mu \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \rho \cdot g_z \cdot \beta \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (4.6)$$

Enerji Denklemi

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \cdot \phi \quad (4.7)$$

Burada;

U_r, U_θ, U_z : r, θ , z Yönündeki Hız Bileşeni, m/s

T : Sıcaklık, °C

μ : Dinamik Viskozite, Pa.s

ρ : Yoğunluk, kg/m³

β : Isıl Genleşme Katsayısı, 1/K

k : İletim Katsayısı, W/m.K

C_p : Suyun özgül ısı, kJ/kg. K

Φ : Viskoz Dissipasyon Terimi

g_r, g_θ, g_z : Yönündeki Yerçekimi İvmesi, m/s²

Bu çalışma kapsamında incelenen IDT için sınır koşullar ve CFD analiz incelemelerinde yapılan kabuller aşağıda verilmiştir.

4.1.3.2 Kabuller ve sınır koşulları

Isıl tasarımda yapılan kabuller aşağıda maddeli şekilde belirtilmiştir.

- θ doğrultusunda sıcaklık ve hız değişimleri ihmal edilmiştir.
- r ve θ yönünde yer çekimi ivmesi bulunmamaktadır.
- Suyun yoğunluk değişimi denklem 4.8'e göre ifade edilmiştir (Boussinesq'in bouyancy yaklaşımına göre) [21].

$$\Delta\rho = \rho \cdot \beta \cdot (T - T_{ref}) \quad (4.8)$$

Burada:

T : Değişken Sıcaklık, °C

T_{ref} : Referans Sıcaklık, °C

β : Isıl Genleşme Katsayısı, 1/K

ρ : Referans Sıcaklıktaki Yoğunluk, kg/m³

$\Delta\rho$: Yoğunluktaki Değişim (Referans Sıcaklıktaki Yoğunluğa göre), kg/m³

θ doğrultusunda sıcaklık ve hız değişimleri ihmal edildiği durum için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıda belirtilen hali almıştır.

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot U_r)}{\partial r} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right] = 0 \quad (4.9)$$

r- Momentum Denklemi

$$\rho \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \cdot \rho \cdot U_r \cdot U_r)}{\partial r} + \rho \frac{\partial(U_z \cdot U_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r \cdot U_r)}{\partial r} \right) \right] + \mu \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} \quad (4.10)$$

z- Momentum Denklemi

$$\rho \frac{\partial U_z}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial (r \cdot U_r \cdot U_z)}{\partial r} + \rho \frac{\partial (U_z \cdot U_z)}{\partial z} = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot U_z)}{\partial r} \right) \right] + \mu \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \rho \cdot g_z \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (4.11)$$

Enerji Denklemi

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + U_r \frac{\partial T}{\partial r} + U_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \cdot \emptyset \quad (4.12)$$

CFD analizlerinde kullanılacak bu denklemler için sınır koşulları aşağıda belirtilmiştir.

Isıl tasarım yapılırken kullanılan başlangıç ve sınır koşulları aşağıda belirtilmiştir:

1- Başlangıç Şartları (t=0)

$$\bullet \quad T = \begin{cases} 90^\circ\text{C} & 0,5 < z/H_s < 1 \\ 70^\circ\text{C} & 0 < z/H_s < 0,5 \end{cases} \quad \left(-\frac{D_s}{2} < r < \frac{D_s}{2} \right)$$

2- Sınır Koşulları

- r=0'da eksenel simetriklik bulunmaktadır.
- $dT/dr = 0, dV_r/dr = 0$
- $z=0 \quad \dot{V} = 696,04 \text{ m}^3/\text{s} @ T = 70^\circ\text{C}$
- $z=H \quad \dot{V} = 696,04 \text{ m}^3/\text{s}$
- $r = R_1$ 'de birim uzunluktaki ısı akışı $q_{yy}'(R_1) = \frac{2\pi k(T_1 - T_\infty)}{\frac{k}{h_{yy}R_2} + \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$ şeklinde ifade edilmiştir (Bknz: Denklem 4.27).

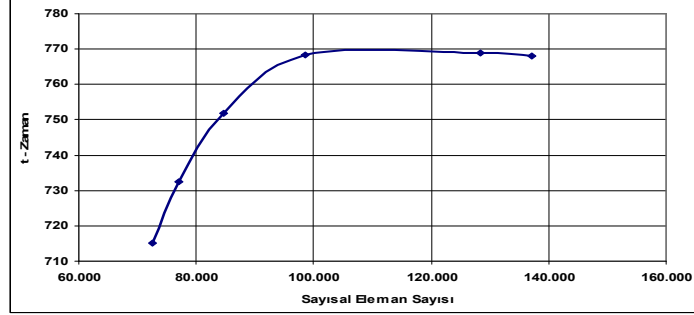
Sınır koşulu olarak verilen $z=0$ ve $z=H$ 'deki su hız değeri boru çapının 150 mm olduğu durum için verilmiştir. Farklı boru çapı için yapılan incelemelerde hacimsel debi sabit alınarak su hızı değerleri hesaplanmış ve CFD analizlerinde kullanılmıştır.

4.1.3.3Çözüm ağının oluşturulması

Sınır ve başlangıç koşulları belirlendikten sonra sayısal çözümün yapılacağı çözüm ağının oluşturulması gerekmektedir. Çözüm ağı oluşturulurken dikkat edilmesi gereken konu, analizde elde edilen çözümün sayısal ağdan bağımsız hale getirilmesidir. Çözüm, sayısal ağdan bağımsız hale getirildikten sonra diğer analizler bu ağ yapısı üzerinden devam edecektir.

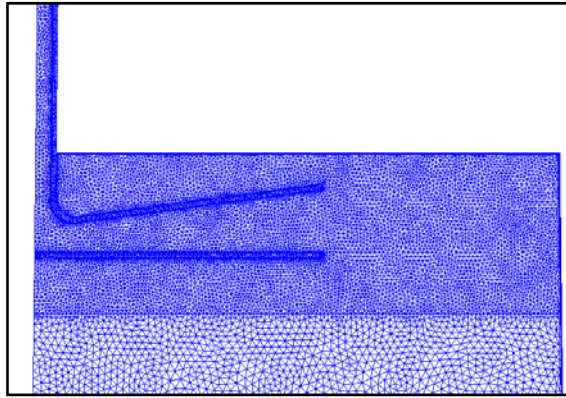
Sayısal ağdan bağımsızlaştırma işlemi yapılırken izlenen yol şöyledir. Kaba kalitedeki ağ yapısından ince kalitedeki ağ yapısına doğru farklı ağ yapısındaki

modeller için CFD analizleri gerçekleştirilmiş ve IDT tasarım kıstası olan boşaltma verimlilik tanımı içindeki zaman terimi her bir ağ yapısı için incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda 98.499 adet ve üzerinde sayısal eleman kullanılması ile elde edilecek olan sonuçların yaklaşık aynı olacağı görülmüştür (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Çözümü Sayısal Ağdan Bağımsızlaştırma Çalışması

Çözümün önemli olduğu yayıcı bölgesinde nispeten sık aralıklı çözüm ağı oluşturulmuştur.



Şekil 4.4: IDT Üst Yarı Çözüm Ağı Yapısı

Sayısal analiz yapılırken çözüm elde edilmesi için sayısal ağ içindeki her bir çözüm noktasında bağımlı değişkenler olan hız, basınç ve sıcaklık değerleri için yakınsama kriterinin bulunması gerekmektedir. Yakınsama kriteri tüm bağımlı değişkenler için 0,0001'dir. Yakınsama ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\left| \frac{\gamma_i - \gamma_{i-1}}{\gamma_i} \right| \leq \gamma = 0,0001 \quad (4.13)$$

CFD analizinde çözölen denklemler zamana bağılı daimi olmayan denklemlerdir. Daimi olamayan çözümdeki zaman adımı 0,5 saniye olarak alınmıştır. Alınan bu zaman değerini kontrol edebilmek için Von Neumann kararlılık analizinin yapılması gerekmektedir. Von Neumann sayısal çözüm kararlılık eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$v \frac{\Delta t}{\Delta h^2} \leq 1 \quad (4.14)$$

Burada;

v : 90 °C Suyun kinematik viskozitesi, m²/s

Δt : Daimi olmayan çözüm zaman aralığı, s

Δh : Çözüm ağı çözüm noktaları arası en kısa mesafe, m

Yapılan analizlerde çözüm ağı içindeki çözüm noktaları arasındaki en kısa mesafe 0,002 m'dir. 90 °C'deki suyun kinematik viskozitesi 0,327.10⁻⁶, olduğu göz önünde tutulursa Von Neumann kararlılık analizi sonucunda daimi olmayan çözümdeki zaman aralığı 6,11 s çıkmaktadır. Bu değer, çözümlerde kullanılan 0,5 s olan zaman adımından çok daha büyüktür.

4.1.3.4 Boşaltma verimliliği ifadesi

IDT üzerine yapılan çalışmalarda her bir parametrenin farklı boyutları arasında karşılaştırma yapabilmek için bir boşaltma verimliliği ifadesi tanımlanmalıdır. Bu çalışmada genel anlamda Lavan & Thompson'un önerdiği boşaltma verimliliği ifadesi kullanılmıştır [17]. Analiz başlangıç koşullarında IDT su ortamının yarısı 70 °C, diğer üst yarısı 90 °C olduğu durum için boşaltma verimliliği ifadesi aşağıda belirtildiği şekilde düzenlenmiştir.

$$\eta = \frac{\dot{V} \cdot t^*}{V_{DA}/2} \quad (4.15)$$

Burada;

$\dot{V}$: Giriş-çıkış hacimsel debi, m³/s

V_{DA} : Isıl enerji depolayıcı su ortamı, m³

t^* : ΔT 'nin %10 oranında azaldığı ana kadar geçen zaman, s

Başlangıç sıcaklık farkında (ΔT) %10 azalmanın olduğu ana kadar geçen süre denklem 4.15'te kullanılan t^* değeridir (Denklem 4.16).

$$\frac{T(t^*) - T_g}{T_c - T_g} = 0,9 \quad (4.16)$$

Burada;

T_g : IDT'e giren başlangıç su sıcaklığı, °C

T_c : IDT'den çıkan başlangıç su sıcaklığı, °C

$T(t^*)$: Sıcaklık farkında %10 düşüşün olduğu andaki çıkış su sıcaklığı, °C

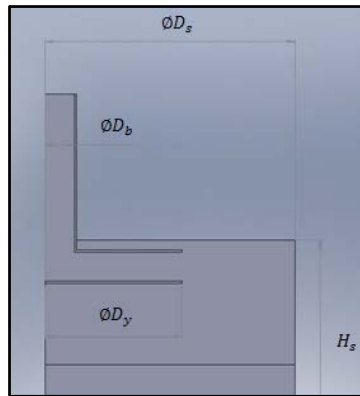
4.1.4 CFD analizi yardımıyla IDT'nin ısı tasarımı

Boşaltma verimliliğine etki eden birçok etken vardır. Bu çalışmada altta verilen etkenler belirtildiği sırada incelenmiştir (Şekil 4.5).

- 1- Yükseklik/Çap oranı
- 2- Yayıcı Çapı
- 3- Giriş-çıkış boru çapı

CFD Analizi gerçekleştirilirken şu adımlar izlenmiştir: Sınır koşulları (simetri, giriş su hızı ve sıcaklığı, çıkış su hızı) ve başlangıç koşulları (Su ortamının alt bölümünün 70 °C ve üst bölümünün 90 °C olduğu) bilgileri belirlendikten sonra çözüm ağı oluşturulmuştur (8 mm; yayıcı bölmesi, 15 mm; orta bölmeler için, toplamda 164.718 adet ağ). Daha sonra yayıcılar çelik olarak, su ortamı "H₂O_Buoyancy" olarak belirlenmiştir. İlk olarak akış analizi zamandan bağımsız olarak (steady state) gerçekleştirilmiştir. Akış analizinde yakınsama olduktan sonra ikinci olarak ısı analize geçilmiştir. Yer çekimi kuvveti IDT'nin yerleşimine göre belirlendikten (y: -1) sonra zaman adımı 0,5 s olarak ayarlanıp zamana bağlı olarak ısı analiz uygulanmıştır. Çıkış boru ucundaki sıcaklık değeri 88 °C'e ulaştığında analiz durdurulmuş ve geçen süre (t^*), boşaltma verimliliği hesaplamalarında kullanılmıştır.

$$T(t^*) = 0,9 \times (T_c - T_g) + T_g \quad (4.17)$$

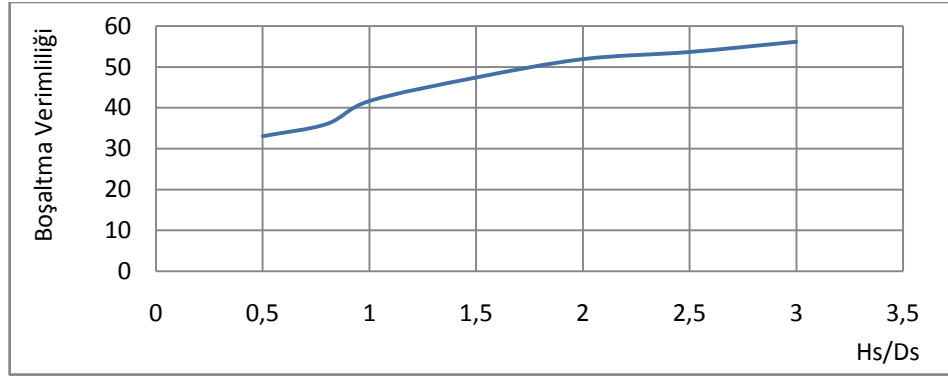


Şekil 4.5: CFD Analizlerinde İncelenen Parametreler

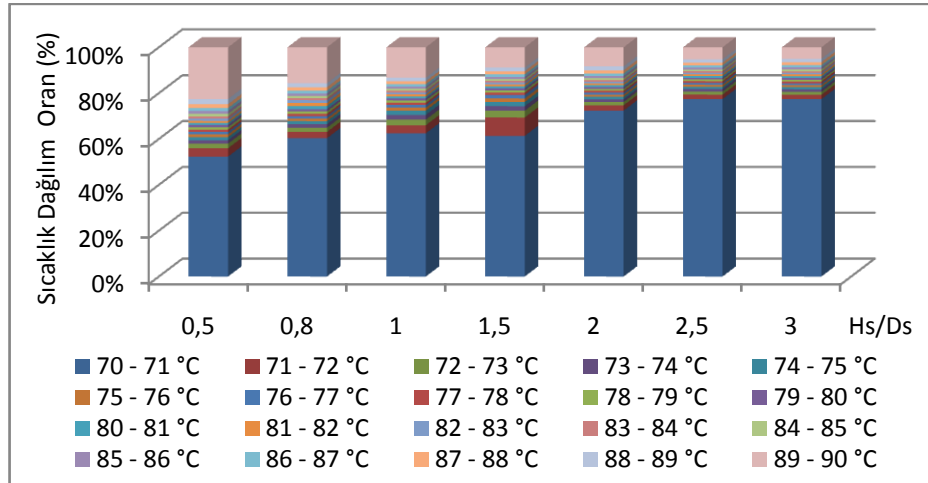
IDT içerisindeki ısı enerji depolayıcı su ortamının hacmi her bir parametre incelemesinde sabittir. Ayrıca su ortamının dışarıya olan ısı kaybı CFD analizlerinde ihmal edilmiştir.

4.1.4.1 Yükseklik/çap oranı

Bu bölümde, su ortamının farklı yükseklik/çap (H_S/D_S) oranları için CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Boşaltma verimliliğinin farklı H_S/D_S oranlarındaki değişimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Her bir H_S/D_S oranı değeri incelenirken diğer parametreler sabit alınmıştır (Yayıcı Çapı, $D_y = 1.400$ mm ve Giriş-Çıkış Boru Çapı, $D_b = 300$ mm).



Şekil 4.6: Farklı H_S/D_S Oranları İçin Boşaltma Verimliliğinin Değişimi



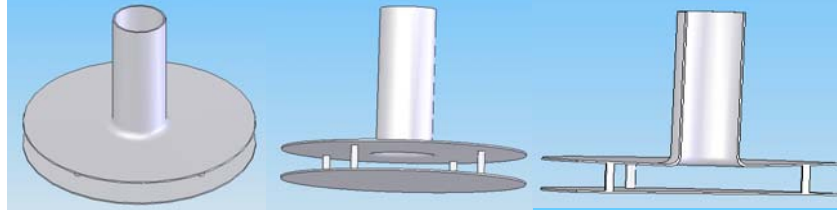
Şekil 4.7: Farklı H_S/D_S Oranları İçin Sıcaklık Dağılımının Değişimi

IDT üst çıkış borusu su sıcaklığının 88 °C'e düştüğü andaki IDT içerisinde gerçekleşen sıcaklık dağılımı Şekil 4.7'de görülmektedir (t^* , Bknz: Bölüm 4.1.3.4). H_S/D_S oranının incelenmesi neticesinde çıkan sonuçlar şunlardır:

- H_S/D_S oranı arttıkça boşaltma verimliliği artmaktadır (Şekil 4.6).
- IDT'deki sonuç sıcaklık dağılımında bulunan yüksek sıcaklıktaki su oranı, H_S/D_S oranı arttıkça, azalmaktadır (Şekil 4.7).

4.1.4.2Yayıcı plaka çapı

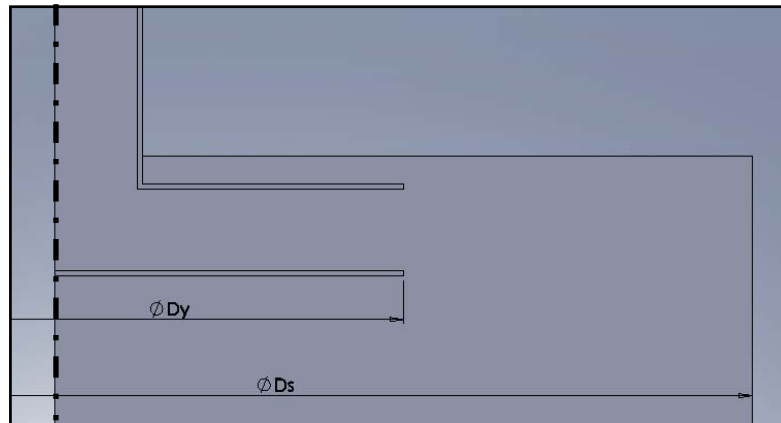
IDT’de kullanılacak yayıcının şematik resmi Şekil 4.8’de görülmektedir.



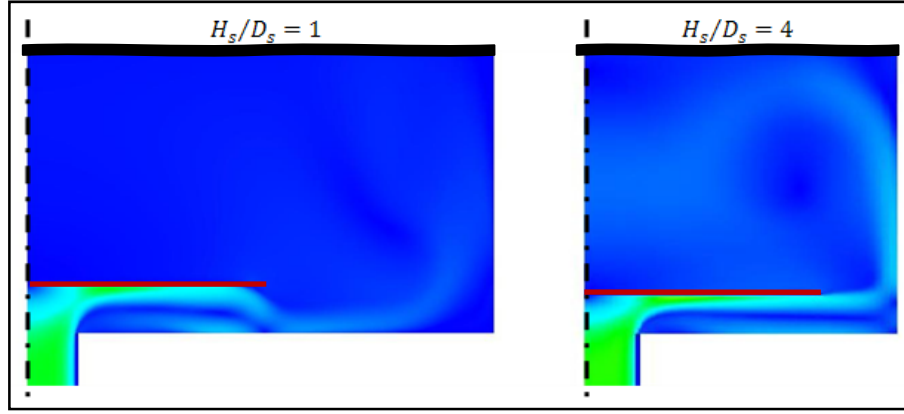
Şekil 4.8: Tasarımda Kullanılacak Yayıcı Tipi

Yayıcı çapının (D_y) sıcaklık katmanlaşmasına olan etkisi incelenirken; yayıcı çapının/su ortamının çapına oranı (D_y/D_s) boşaltma verimliliğine etkiyen boyutsuz parametre olarak alınmıştır (Şekil 4.9). Bu boyutsuzlandırmanın amacı yayıcıdan depo içine giren suyun tank duvarının iç yüzeyine çarpmasıyla oluşan karışmanın önlenmesini sağlamaktır. Örnek vermek gerekirse; Şekil 4.10’da $D_s = 2,93$ m’nin olduğu $H_s/D_s = 1$ ve $D_s = 1,85$ m’nin olduğu $H_s/D_s = 4$ olduğu değerlerdeki yayıcı çıkışındaki akışın depo içerisinde nasıl yönlendiği görülmektedir. Bu görüntülerde IDT’nin kesilmiş halleri bulunmaktadır. Her iki H_s/D_s oranı için yayıcı çapı değeri sabittir ($D_y = 1,60$ m). Bu sebeplerden dolayı yayıcı çapının IDT içerisindeki sıcaklık katmanlaşmasına olan etkisini incelemek için boşaltma verimliliğinin değişimi D_y/D_s ’e göre incelenmiştir.

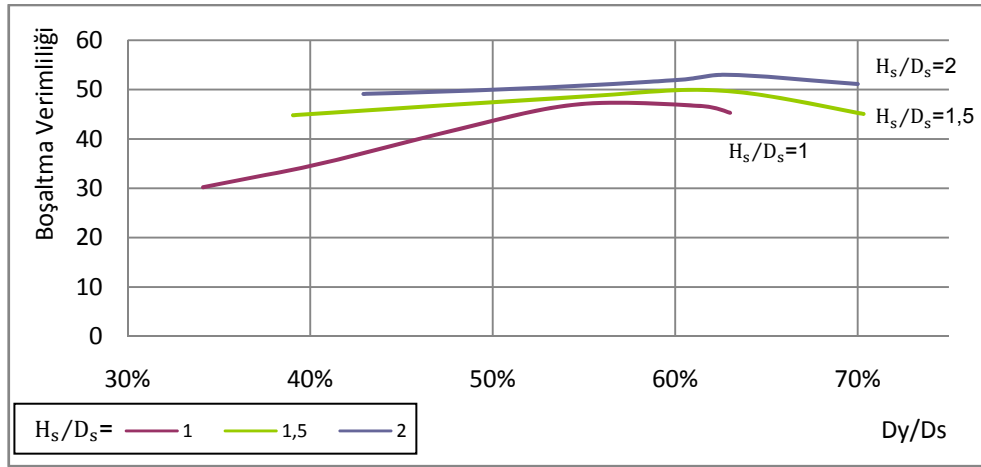
Şekil 4.11’de H_s/D_s oranının farklı değerlerinde D_y/D_s ’nin boşaltma verimliliğine olan etkisi görülmektedir. Grafikte her bir çizgi boyunca sabit H_s/D_s (1; 1,5 veya 2) oranında D_y/D_s ’nin değişimi incelenmiştir.



Şekil 4.9: Yayıcı Çapının Depo Çapına Oranı (D_y/D_s)



Şekil 4.10: Yayıcı Çapı/Depo Çapı Oranının Büyük Olmasının Etkisi



Şekil 4.11: Farklı D_y/D_s Oranları İçin Boşaltma Verimliliğinin Değişimi

Yayıcı çapı parametresinin incelenmesinden çıkan sonuçlar şunlardır:

- Şekil 4.6 incelendiğinde boşaltma verimliliğinin $\eta_{H_s/D_s=2} > \eta_{H_s/D_s=1,5} > \eta_{H_s/D_s=1}$ şeklinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi; her bir H_s/D_s oranları için yapılan D_y/D_s incelemeleri, üstte verilen boşaltma verimliliği sıralamasına göre konumlanmaktadır.
- Şekil 4.11'de görüldüğü gibi; her bir H_s/D_s oranı için yapılan incelemede boşaltma verimliliğinin, D_y/D_s 'nin değerinin %60 - %63 aralığında olduğu bölgede en yüksek olduğu görülmektedir.

4.1.4.3 Giriş - çıkış boru çapı

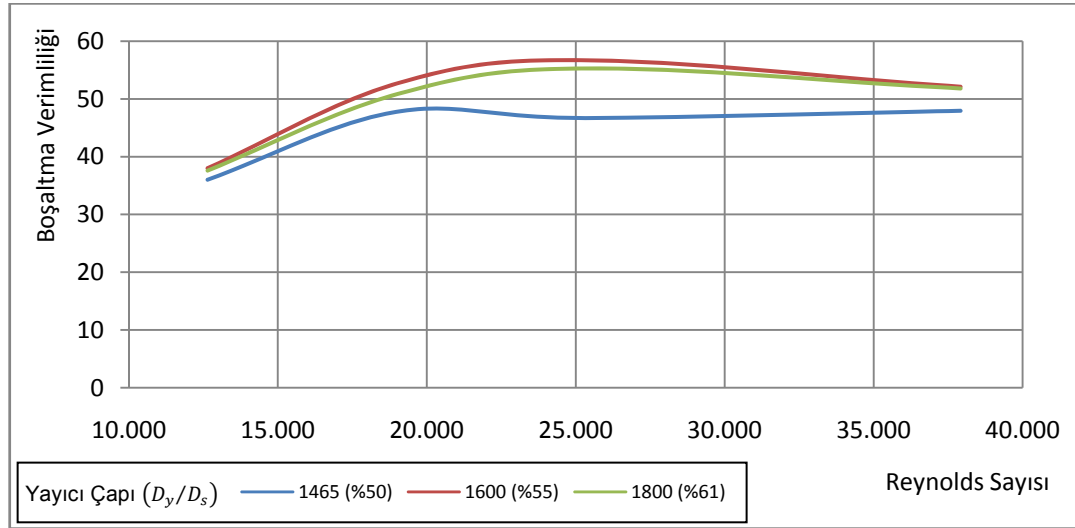
Bu bölümde IDT içerisindeki sıcaklık katmanlaşmasına etki eden üçüncü etken olan giriş - çıkış boru çapının (D_b) farklı değerlerinde boşaltma verimliliğinin değişimi incelenmiştir.

Her incelemede boru çapı arttıkça, hacimsel debinin sabit ($\dot{V} = \text{sbt.}$) olmasından dolayı boru içerisinde geçen akışın hızı azalmaktadır. Dolayısıyla reynolds sayısı boru çapı arttıkça azalmaktadır (Bknz: Denklem 4.18).

$$Re_D = \frac{D_b \times \frac{\dot{V}}{\pi D_b^2 / 4}}{v} = \frac{4\dot{V}}{D_b v \pi} \quad (4.18)$$

Giriş – çıkış boru çapının boşaltma verimliliğine olan etkisi, bağımsız değişken olan boru içindeki akışın reynolds değerine göre incelenmiştir.

H_s/D_s ve D_y/D_s oranı parametrelerinin farklı değerlerinde boru çapı değişimi incelenmiştir. Şekil 4.12’de $H_s/D_s = 1$ olduğu durumdaki; yayıcı çapının farklı değerlerinde boru çapının boşaltma verimliliğine olan etkisi görülmektedir.



Şekil 4.12: Boru Çapının Boşaltma Verimliliğine Olan Etkisi ($H_s/D_s = 1$)

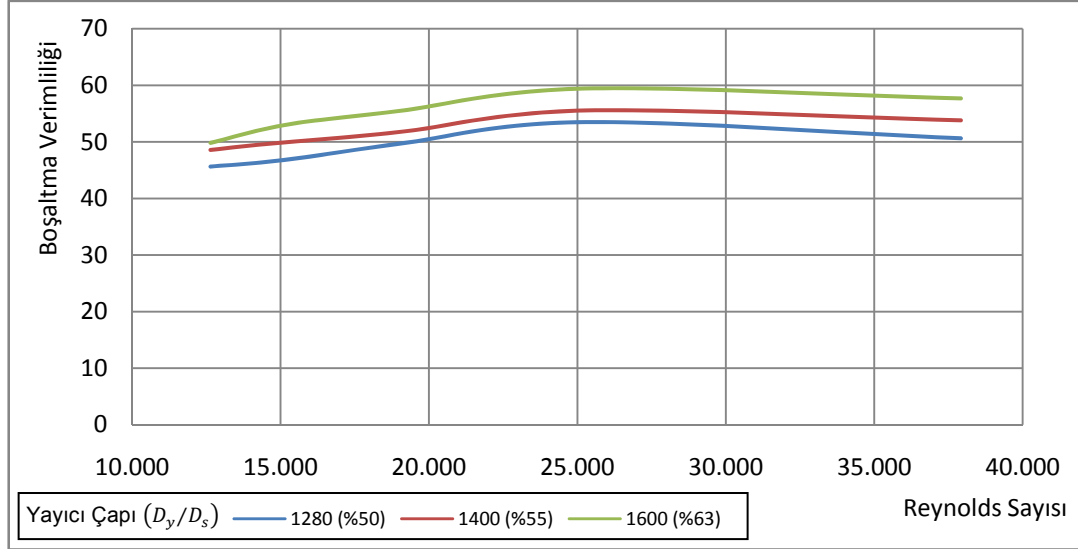
Şekil 4.13’te $H_s/D_s = 1,5$ olduğu durumdaki; yayıcı çapının farklı değerlerinde boru çapının boşaltma verimliliğine olan etkisi görülmektedir.

Boru çapı parametresinin incelenmesinden çıkan sonuçlar şunlardır:

- $H_s/D_s = 1$ için boşaltma verimliliğinin $\eta_{D_y/D_s=55} > \eta_{D_y/D_s=61} > \eta_{D_y/D_s=50}$ şeklinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.11). Şekil 4.12’de görüldüğü gibi; her bir D_y/D_s oranları için yapılan boru çapı incelemeleri üstte belirtilen verimlilik sıralamasına göre konumlanmaktadır.
- $H_s/D_s = 1,5$ için boşaltma verimliliğinin $\eta_{D_y/D_s=63} > \eta_{D_y/D_s=55} > \eta_{D_y/D_s=50}$ şeklinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.11). Şekil 4.13’te görüldüğü gibi; her bir

D_y/D_s oranları için yapılan boru çapı incelemeleri üstte belirtilen verimlilik sıralamasına göre konumlanmaktadır.

- H_s/D_s değerinin 1 ve 1,5 olduğu durum için farklı yayıcı çaplarındaki incelemelerin hepsinde $Re_D = 25.280$ değerinde ($D_b = 150$ mm) en yüksek boşaltma verimliliği görülmektedir.



Şekil 4.13: Boru Çapının Boşaltma Verimliliğine Olan Etkisi ($H_s/D_s = 1,5$)

4.1.4.4CFD analizi yardımıyla IDT'nin ısı tasarımı - sonuç

Bu bölümde boşaltma verimliliğine etki eden H_s/D_s oranı, D_y/D_s oranı ve boru çapı (giriş – çıkış reynolds sayısı) etkenleri için yapılan CFD analizlerinin sonuçları gösterilmiştir. IDT içerisindeki su ortamının yüksekliğin çapa olan oranı (H_s/D_s) arttıkça boşaltma verimliliği artmaktadır.

Daha sonra yayıcı çapının boşaltma verimliliğine etkisi incelenmiştir. Yayıcı depo içi çıkış kısmının IDT gövde yüzeyine çok yakın olması ile su ortamında karışma sağlanmaması için yayıcı çapının depo çapına (D_y/D_s) oranına göre boşaltma verimliliğinin değişimi incelenmiştir. H_s/D_s 'nin farklı değerlerinin her biri için gerçekleştirilen D_y/D_s 'nin boşaltma verimliliğine olan etkisi incelemesinde; çıkan eğriler H_s/D_s incelemesi sonucu çıkan boşaltma verimliliği sıralamasına göre konumlanmıştır. D_y/D_s değerinin %60 - %63 aralığında en yüksek boşaltma verimliliği görülmüştür.

En son parametre olan giriş – çıkış boru çapı incelemesinde; boşaltma verimliliğinin değişimi, H_s/D_s ile D_y/D_s oranı parametrelerinin farklı değerleri için reynolds sayısına göre gözlenmiştir. Hacimsel debi sabit olduğundan dolayı boru çapı arttıkça

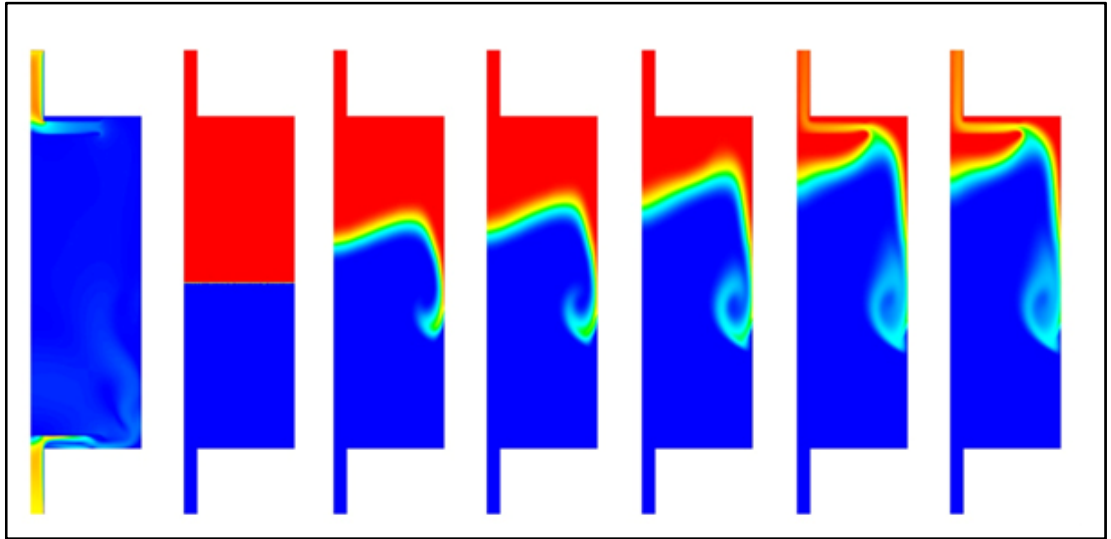
reynolds sayısı azalmaktadır. D_y/D_s 'nin farklı değerlerinin her biri için gerçekleştirilen giriş – çıkış boru çapının boşaltma verimliliğine olan etkisi incelemesinde; çıkan eğriler D_y/D_s incelemesi sonucu çıkan boşaltma verimliliği sıralamasına göre konumlanmıştır. H_s/D_s değerinin 1 ve 1,5 olduğu durum için farklı yayıcı çaplarındaki incelemelerin hepsinde $D_b = 150$ mm olduğu $Re_D = 25.280$ değerinde en yüksek boşaltma verimliliği görülmüştür.

Bu bölümden sonra gerçekleştirilecek olan yalıtım kalınlığı hesaplamasında ve mekanik tasarım kısmında; $H_s/D_s = 1,5$ olarak seçilmiş, $D_y/D_s = \%63$ olduğu durum için yayıcı çapı (D_y) 1.600 mm olarak hesaplanmış ve giriş – çıkış boru çapı (D_b) analiz sonuçlarına göre 150 mm olarak belirlenmiştir. CFD Analizi sonucu çıkan boşaltma verimliliğini en yüksek yapan IDT boyutları değerleri Tablo 4.3'te görülmektedir.

Tablo 4.3: CFD Analizi Sonucu IDT'nin Boyutları [mm]

H_s/D_s	H_s	D_s	D_y	D_b
1,5	3.830	2.560	1.600	150

IDT'nin sonuç boyutu için CFD analiz aşamaları Şekil 4.14'te görülmektedir. Şekildeki ilk görüntü akış çözümü, daha sonraki görüntüler ilerleyen zaman dilimindeki ısıllı çözümlerdir.



Şekil 4.14: CFD Çözümü – Akış Ve Isıl Analiz Görüntüleri

4.1.5 Yalıtım kalınlığının belirlenmesi

IDT yalıtım kalınlığı için tasarım girdisi; dış ortam sıcaklığının -30 °C olduğu durumda en yüksek 5 kW ısı kaybının olması gerektiği bilgisidir. En yüksek ısı kaybı IDT içerisindeki sıcaklığın en yüksek olduğu anda gerçekleşmektedir. Yalıtım

kalınlığı hesaplamaları yapılırken IDT iç sıcaklığının 90 °C olduğu an göz önünde bulundurulmuştur. Bu tasarım girdisini sağlamak için IDT'nin yalıtım kalınlığı belirlenirken ısı kaybının IDT gövdesi ile üst başlıkta iletim ve taşınım ve IDT tabanında iletimle olduğu öngörülerek hesaplamalar yapılmıştır. Işınım ile olan ısı kaybı ve kazancı hesaplamalara dahil edilmemiştir.

İletim ve taşınım ile olan ısı kaybı denkleminin IDT yan yüzeyi ve üst başlık için çıkarımı aşağıda belirtilmiştir. Silindirik koordinatlardaki denge denklemi ve her boyut için tek boyutlu Fourier ifadeleri, sırasıyla hem silindirik koordinat hem de Kartezyen koordinat için verilmiştir (Şekil 4.15).

Silindirik Koordinat (IDT Yan Yüzeyi için):

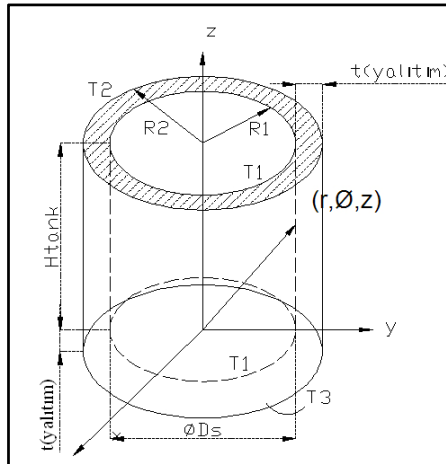
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (4.19)$$

$$\hat{q}_r = -k \frac{\partial T}{\partial r}; \hat{q}_\phi = -\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi}; \hat{q}_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.20)$$

Kartezyen Koordinat (IDT Tabanı için):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (4.21)$$

$$\hat{q}_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}; \hat{q}_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}; \hat{q}_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.22)$$



Şekil 4.15: Yalıtım Kalınlığının Şematik Şekli

Yapılan Kabuller (Her İki Koordinat Sistemi için):

- Sadece yalıtım malzemesindeki ısı kaybı göz önünde bulundurulmuştur.

- IDT et kalınlığındaki iletimle olan ısı geişı ihmal edilerek yalıtım iç yüzey sıcaklığı su sıcaklığına eşit alınmıştır.
- Yalıtım malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısı (k) homojen dağılımlıdır ve sabittir.
- IDT içerisinde ısı üretimi bulunmamaktadır ($\dot{q} = 0$).
- Deponun 90 °C sıcaklığındaki su ile dolu ve dış ortam sıcaklığının –30 °C olduğu an için yalıtım kalınlığı hesaplanmaktadır (Bkz: Bölüm 4.1.1) ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$).
- IDT'nin yan yüzeylerinde ve üst başlıkta kullanılan yalıtım aynı kalınlıktadır.

Yapılan Kabuller (Silindirik Koordinat Sistemi için):

- z yönünde eş sıcaklık dağılımı bulunmaktadır ($\frac{\partial T}{\partial z} = 0$).
- $\emptyset$ yönünde eş sıcaklık dağılımı bulunmaktadır ($\frac{\partial T}{\partial \emptyset} = 0$).

Yapılan Kabuller (Kartezyen Koordinat Sistemi için):

- Sadece z yönünde ısı kaybı bulunmaktadır ($\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$).

Yan yüzeydeki ısı kaybı hesaplamaları aşağıda gösterilmiştir.

Denge denkleminin yapılan kabuller doğrultusundaki basitleştirilmiş hali aşağıda belirtilmiştir.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (4.23)$$

Boyutsuzlandırma işleminin yapılp denklemin integrasyonu ile bulunan sonuç denklem aşağıdaki gibidir.

$$T = C_1 \cdot \ln \left(\frac{r}{R_1} \right) + C_2 \quad (4.24)$$

İntegrasyon sabitlerini belirlemek için IDT'nin sınır koşullarını belirlemek gerekmektedir. $T(R_1) = T_1 = 90$ °C sınır koşulu için $C_2 = T_1$ çıkmaktadır. IDT ile dış ortamdaki havanın ara yüzeyinde ($r = R_2$) sıcaklık ve ısı akışı süreklilik göstermektedir. İletimle olan ısı akışı $q_{yy}''(r) = -k \frac{dT}{dr}$ denklemi ile ifade edilmektedir.

$$q_{yy}''(r = R_2) = -k \frac{C_1}{R_2} = h_{yy} \left[\left(C_1 \cdot \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + T_1 \right) - T_{\infty} \right] \quad (4.25)$$

Bu denklemden C_1 integral sabitinin bulunmasıyla boyutsuz formdaki sıcaklık ifadesi aşağıda belirtildiği gibidir.

$$\frac{T_1 - T}{(T_1 - T_\infty)} = \frac{\ln(r/R_1)}{\frac{k}{h_{yy} \cdot R_2} + \ln(R_2/R_1)} \quad (4.26)$$

Depo yüksekliği boyunca taşınım ve iletimle olan birim uzunluktaki ısı akışı denklemi aşağıda belirtilmiştir.

$$q_{yy}' = 2h\pi r \times \left\{ \left[-\frac{T_1 - T_\infty}{\frac{k}{h \times R_2} + \ln \frac{R_2}{R_1}} \right] \times \ln \left(\frac{r}{R_1} \right) + T_1 - T_\infty \right\} \quad (4.27)$$

IDT dış yüzeyinde doğal taşınım gerçekleşmektedir. Doğal taşınımdaki ısı taşınım katsayısını (h_{yy}) aşağıda belirtilen yolla bulunmuştur. Doğal taşınım, boyutsuz ifade biçimi olarak Grashof sayısı ile tanımlanmaktadır.

$$Gr = \frac{\rho \cdot \beta \cdot |T_2 - T_\infty| \cdot H_{tank}^3}{\gamma^2} \quad (4.28)$$

Burada:

ρ : Havanın yoğunluğu, kg/m^3

T_2 : IDT yüzey sıcaklığı, $^\circ\text{C}$

T_∞ : Ortam sıcaklığı, $^\circ\text{C}$

H_{tank} : IDT yüksekliği, m

ν : Kinematik viskozite (μ/ρ), m^2s^{-1}

β : Hacim genleşme katsayısı

Doğal taşınım incelemesinde dikey silindirler için ısı taşınım katsayısı (h), IDT içerisindeki suyun çap/yükseklik oranı $35/Gr^{0,25}$ 'ten küçük olduğu durumlar için aşağıda verilen denklemden bulunmaktadır [22, 23].

$$Nu_{yy} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(Gr.Pr)^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \cdot \left[1 + 1,43 \left(\frac{H_s}{D_s \cdot Gr^{0,25}} \right)^{0,9} \right] \quad (4.29)$$

$$h_{yy} = \frac{k \cdot Nu_{silindir}}{H_s} \quad (4.30)$$

Üst Başlıktaki Isı Kaybı:

Sadece z yönünde ısı kaybı vardır $\left(0 = k \frac{d^2T}{dz^2}, \hat{q}_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}\right)$.

Taşınilma ve iletimle olan birim alandaki ısı akışı ($\dot{Q}_{\text{başlık}}$) denklemi aşağıda belirtilmiştir.

$$\frac{\dot{Q}_{\text{başlık}}}{A_{\text{başlık}}} = h_{\text{başlık}} \cdot (T_{\infty} - T_3) = \frac{k}{t_{\text{yalıtım}}} \cdot (T_3 - T_1) \quad (4.31)$$

$$\dot{Q}_{\text{başlık}} = \frac{(T_{\infty} - T_1)}{\frac{t_{\text{yalıtım}}}{A_{\text{başlık}} \cdot k} + \frac{1}{h_{\text{başlık}} \cdot A_{\text{başlık}}}} \quad (4.32)$$

IDT üst başlığın dış yüzey sıcaklığı (T_3) aşağıdaki denklemle bulunmuştur.

$$T_3 = T_{\infty} + \frac{\dot{Q}_{\text{başlık}}}{A_{\text{başlık}} \cdot h_{\text{başlık}}} \quad (4.33)$$

Üst başlıkta gerçekleşen doğal taşınilmadaki ısı taşınilm katsayısı ($h_{\text{başlık}}$) aşağıda belirtilen yolla bulunmuştur.

$$Gr = \frac{\rho \cdot \beta \cdot |T_3 - T_{\infty}| \cdot D_s^3}{\gamma^2} \quad (4.34)$$

$$Nu_{\text{Plaka}} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(Gr \cdot Pr)^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (4.35)$$

$$h_{\text{başlık}} = \frac{k \cdot Nu_{\text{Plaka}}}{A_{\text{başlık}}} \quad (4.36)$$

Tabandaki Isı Kaybı:

Sadece z yönünde ısı kaybı vardır $\left(0 = k \frac{d^2T}{dz^2}, \hat{q}_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}\right)$.

Tabandaki ısı kaybı incelenirken çelik malzemeden ve beton kaideden toprağa olan iletimle olan ısı geçişi incelenmiştir.

İletimle olan ısı geçişi denklem 4.37 ile elde edilen ısı akısının taban alanı ile çarpılması ile ifade edilmektedir (Denklem 4.38).

$$\hat{q}_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.37)$$

$$q_z = \hat{q}_z \times A_{\text{taban}} \quad (4.38)$$

Çoklu katmanlarda gerçekleşen iletimle olan ısı geçişi ifadesi aşağıda belirtilmiştir.

$$\dot{Q}_{\text{taban}} = \frac{(T_1 - T_{\text{toprak}})}{\frac{t_{\text{taban}}}{A_{\text{taban}} \cdot k_{\text{St37}}} + \frac{t_{\text{kaiide}}}{A_{\text{taban}} \cdot k_{\text{Beton}}}} \quad (4.39)$$

Toprak sıcaklığının (T_{toprak}) 10 °C olduğu durum için IDT tabanındaki çelik malzemeden ($k_{\text{St37}} = 46 \text{ W/mK}$) ve beton kaideden ($k_{\text{kaide}} = 1,7 \text{ W/mK}$) olan ısı kaybı 3.495 W'dır. Kaide kalınlığı (t_{kaide}) 200 mm'dir.

IDT'deki azami ısı kaybı değerinin 5.000 W olması gerektiği tasarım girdilerinde belirtilmiştir.

$$\dot{Q}_{\text{toplam}} = \dot{Q}_{\text{taban}} + \dot{Q}_{\text{yy}} + \dot{Q}_{\text{başlık}} = 3.500 + 1.341 + 200 = 4.940 \text{ W} \quad (4.40)$$

Hesaplamalarda kullanılan havanın fiziksel özellik değerleri Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Havanın bu fiziksel özelliklerine bağlı olarak Grashof sayısı yan yüzey için $5,68 \times 10^{10}$ olarak çıkmıştır ve $35/\text{Gr}^{0,25}$ değeri 0,713 olarak çıkmıştır. bu çıkan değerlere göre Denklem 4.28'deki Nusselt formülü kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Yalıtım malzemesi olarak taş yünü kullanılmıştır ve taş yünü'nün ısı iletim katsayısı $k = 0,04 \text{ W/m.K}$ 'dir.

Tablo 4.4: Havanın Fiziksel Özellik Değerleri

Sıcaklık	60	°C
ρ	1,025	kg/m ³
β	0,003	1/K
ν	1,94E-06	m ² /s
Pr	0,71	

Yalıtım kalınlığı hesaplamaları üstte belirtilen denklemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yalıtım tasarım girdileri Tablo 4.5'te verilmiştir. Üst başlık ve yan yüzey için ısı taşınım katsayısı başlangıç değer olarak verilmiş ve hesaplamalar sonucu çıkan yalıtım kalınlık değeri için taban ve yan yüzey için ısı taşınım katsayısı tekrar hesaplanmıştır. İlk başta verilen ısı taşınım katsayısı ile çıkan ısı taşınım katsayısı birbirine yakınsayana kadar işlem tekrarlanmıştır.

Tablo 4.5: Yalıtım Kalınlığı Tasarım Girdileri

R_1	1,286	m
T_1	90	°C
T_∞	-30	°C
Azami Isı Kaybı	5.000	W
Tank Yüksekliği	4,00	m
A(tavan)	5,18	m ²

Isı kaybı ile üst başlık ve yan yüzey için çıkan ısı taşınım katsayısı ile her bir yüzeyden olan ısı kaybı değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir. Yalıtım kalınlığı, taş yünü için 200 mm çıkmıştır.

Tablo 4.6: IDT Isı Kaybı Sonuç Değerleri

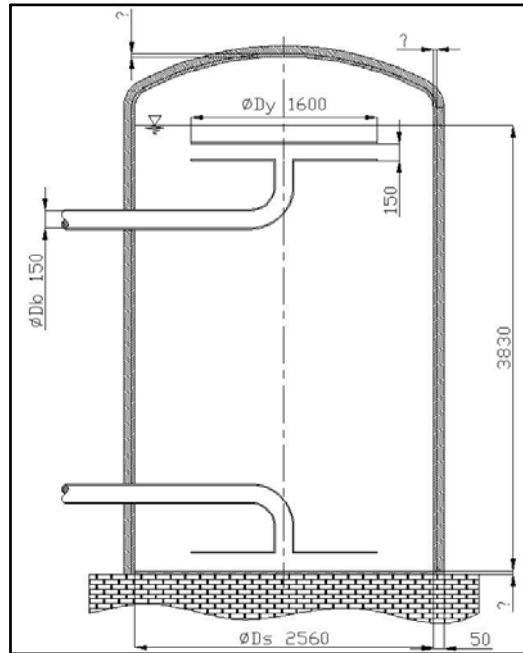
	h (W/m ² K)	Isı Kaybı (W)
Yan Yüzey	6,71	1,341
Üst Başlık	3,97	200
Taban	-	3.495
Toplam	-	5.036

4.1.6 Isı depolama sisteminin ısı tasarım - sonuç

Bu bölümde, IDT içerisindeki ısı enerji depolayıcı akışkan olarak kullanılan suyun hacmi ve tasarım girdisi olan yükleme/boşaltma gücünü sağlayacak şekilde giriş-çıkış debi değeri hesaplanmıştır. Daha sonra belirlenen IDT boşaltma verimliliği karşılaştırma kistası olarak kullanılarak ısı enerji depolayıcı su ortamının yükseklik/çap oranı, IDT giriş-çıkış boru iç çapı ve yayıcı plaka çapı değerleri en yüksek boşaltma verimliliğini sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Daha sonra yalıtım kalınlığı, çıkan ısı enerji depolayıcı su ortamının boyutlarına göre hesaplanmıştır. Sonuç depo boyutları ve yalıtım kalınlığı Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

4.2 IDT'nin Mekanik Boyutlandırması

Isıl enerji depolayıcı akışkan olan su ortamının boyutlarının belirlenmesinden sonra bu su ortamını muhafaza eden tank boyutları belirlenmelidir. Bu bölümde gövde ile taban ve tavan için kullanılacak başlık kalınlıkları boyutlandırması yapılmış ve daha sonra Sonlu Eleman Analizi (SEA) ile IDT üzerinde oluşan gerilme ve yer değiştirme incelenmiştir.

**Şekil 4.16:** IDT Su Ortamı Ve Yalıtım Boyutları [mm]

4.2.1 Basıncılı kap tasarımı

Basıncılı kap tasarımı yapılacağı zaman aşağıdaki tasarım ölçütlerinin öncelikle belirlenmesi gerekmektedir.

1. İşletme sıcaklığı ve basıncı
2. Kap boyutları
3. Cidar malzemesi
4. Başlık türü
5. Boru bağlantı ağız boyutları

Yukarıdaki tasarım ölçütlerinin belirlenmesinden sonra çalışma şartlarına göre etkiyen kuvvetlerin tanımlanması gerekmektedir ve uluslararası kodlar ve regülasyonların kısıtlamaları göz önünde bulundurularak analitik yöntemlerle basıncılı kap tasarımı gerçekleştirilir. Bu çalışmada, iç basınç altındaki basıncılı kap tasarımına göre kalınlıkların belirlenmesi için “Rules For Construction of Pressure Vessels, ASME Section VIII Division I, 2001 Edition” kodu kullanılmıştır [24, 25, 26].

IDT boyutları ısı boyutlandırma sonucunda belirlenmiştir (Bknz. bölüm 4.1.6). Sonuç ısı enerji depolayıcı su ortamının boyutları (IDT iç boyutları) $H_s = 3.830$ mm ve $D_s = 2.560$ mm’dir. IDT ve yayıcı malzemesi St 37’dir. St 37’nin akma dayanımı $\sigma_a = 240$ N/mm²’dir. IDT, çalışma sıcaklığı 70 – 90 °C olan su ortamının hidrostatik basıncına ve korozyon etkiden koruma amaçlı tank üst bölümünde bulunan azot basıncına maruz kalmaktadır. Giriş – çıkış boru çapı 150 mm’dir ve ayrıca IDT gövdesinde tank içerisine ulaşımı sağlayacak adam giriş deliği açıklığı da bulunmaktadır. IDT yere, taşıyıcı ayak olmaksızın kaide üstüne monte edilmektedir.

IDS’de sistemin verimliliğini belirleyen etkenlerden bir tanesi ‘kullanılan su ortamı’dır. Depo içerisindeki üst yayıcı ile alt yayıcı arasındaki bölme dışında kalan bölmelerde ölü hacim bulunmaktadır. Ölü hacmi olabildiğince azaltmak için deponun suyla temas eden alt başlığının düz yapılması uygun olmaktadır. Depo üst başlığında ise düz başlık kullanılmasının zorunluluğu bulunmamaktadır. Düz başlıkta diğer başlıklara göre daha fazla et kalınlığı çıkmasından dolayı deponun üst bölümünde torisferik başlık kullanılmasında sakınca yoktur. Sonuç olarak, IDT’nin alt bölümü düz başlık, üst bölümü ise torisferik başlık olarak belirlenmiştir.

Tasarım ölçütlerinden rüzgar ve deprem yükü hesaplamalara dahil edilmemiştir.

4.2.1.1 İç Basınç altındaki IDT’nin et kalınlığı

İç basınç altındaki basıncılı kapların tasarımında et kalınlığını belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılır [24].

$$t_g = \frac{p_t \cdot R_S}{\sigma_{em} \cdot E - 0,6 p_t} \quad (4.41)$$

Burada;

t_g : Gövde et kalınlığı, m

p_t : İzin verilen en büyük çalışma basıncı, kPa

R_S : Depo iç yarıçapı, m

σ_{em} : Malzemenin izin verilen gerilme değeri, kPa

E : Kaynak verim katsayısı

Emniyet katsayısı $K = 3,3$ olarak alınmıştır. Buna göre izin verilen gerilme değeri $\sigma_{em} = 162,4 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. IDT içerisindeki su ortamının ve azot gazının tabandaki toplam basıncı $p_t = 192 \text{ kPa}$ 'dır (Denklem 4.42). IDT et kalınlığı hesaplamalarında çalışma basıncı bu değer olarak kabul edilmiştir. Çift taraflı (kaynak yüzeyinin hem içinde hem dışında aynı kalitede kaynak dolgusu sağlayacak şekilde) yapılmış alın kaynaklı bağlantı için kaynak verim katsayısı $E = 0,85$ olarak alınmıştır.

$$p_t = p_a + p_h = 151,3 + 40 = 191,3 \text{ kPa} \quad (4.42)$$

Buhar, su veya basınçlı hava servislerinde karşılaşılabilecek yenim (t_{g_yp}) sorununa karşı malzeme et kalınlığı, tasarım bağıntıları sonucunda bulunan et kalınlığından daha fazla olmalıdır. "ASME Boiler and Pressure Vessel Code" içerisinde kalınlıkları 6 mm'den daha az olan kaplar için yenim payı hesaplanan levha kalınlığının 1/6'sından az olmaması konusunda bir kural bulunmaktadır [24].

$$t_{IDT} = t_g + t_{g_yp} = 4,29 + 0,72 = 5,1 \text{ mm} \quad (4.43)$$

Yenim payının da dahil edildiği sonuç IDT et kalınlığı 6 mm'e yuvarlanmıştır.

4.2.1.2 Basınçlı kap başlığı için et kalınlığının belirlenmesi

Başlık türünün farklı olmasına göre et kalınlığı formülü değişiklik göstermektedir. IDT'nin taban bölümü için düz başlık ve tavan bölümü için torisferik başlık kullanılmıştır. Torisferik ve düz başlık için kullanılan ilgili et kalınlığı formülleri alt başlıklarda verilmiştir [24].

Torisferik başlık (t_{bt}) hesaplamalarında aşağıda belirtilen denklemler kullanılmıştır (Şekil 4.17).

$$t_{bt} = \begin{cases} \frac{0,885 p_t \times L}{\sigma_{em} E - 0,1 p_t} & ; \frac{L}{r} = 16 \frac{2}{3} \\ \frac{p_t \times L \times M}{\sigma_{em} E - 0,1 p_t} & ; \frac{L}{r} < 16 \frac{2}{3} \end{cases} \quad (4.44)$$

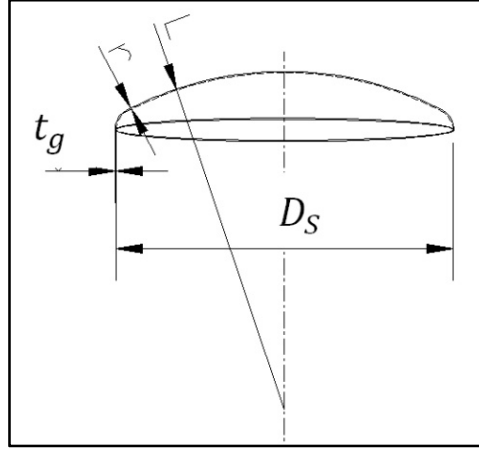
Burada;

t_{bt} : Torisferik başlık et kalınlığı, m

r : Torisferik başlık köşe yarıçapı, m

$$M = 0,25 \left(3 + \sqrt{L/r} \right) \quad (4.45)$$

İzin verilen en büyük L değeri $L = D_S + 2t_g$ 'dir [24].



Şekil 4.17: Torisferik Başlık

$$t_{IDT_bt} = t_{bt} + t_{bt_yp} = 5 + 0,8 = 5,8 \text{ mm} \quad (4.46)$$

IDT torisferik başlık et kalınlığı hesaplamalarında en büyük L değeri kullanılmıştır. Yenim payının (t_{bt_yp}) da dahil edildiği sonuç IDT torisferik başlık et kalınlığı 6 mm'e yuvarlatılmıştır.

Düz başlık et kalınlığı aşağıdaki denkleme göre hesaplanmaktadır (Şekil 4.18) [24].

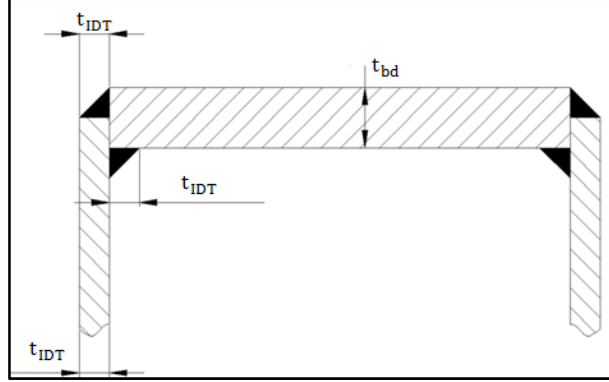
$$t_{bd} = D_S \times \sqrt{C \times p_t / \sigma_{em} \times E} \quad (4.47)$$

$$C = 0,33(t_g/t_{IDT}), C_{min} = 0,2 \quad (4.48)$$

$t_g/t_{IDT} = 0,716$ için $C = 0,24$ çıkmıştır.

$$t_{IDT_bd} = t_{bd} + t_{bd_yp} = 6,1 + 1 = 7,1 \text{ mm} \quad (4.49)$$

Yenim payının (t_{bd_yp}) da dahil edildiği sonuç IDT düz başlık et kalınlığı 8 mm'e yuvarlanmıştır.



Şekil 4.18: Düz Başlık

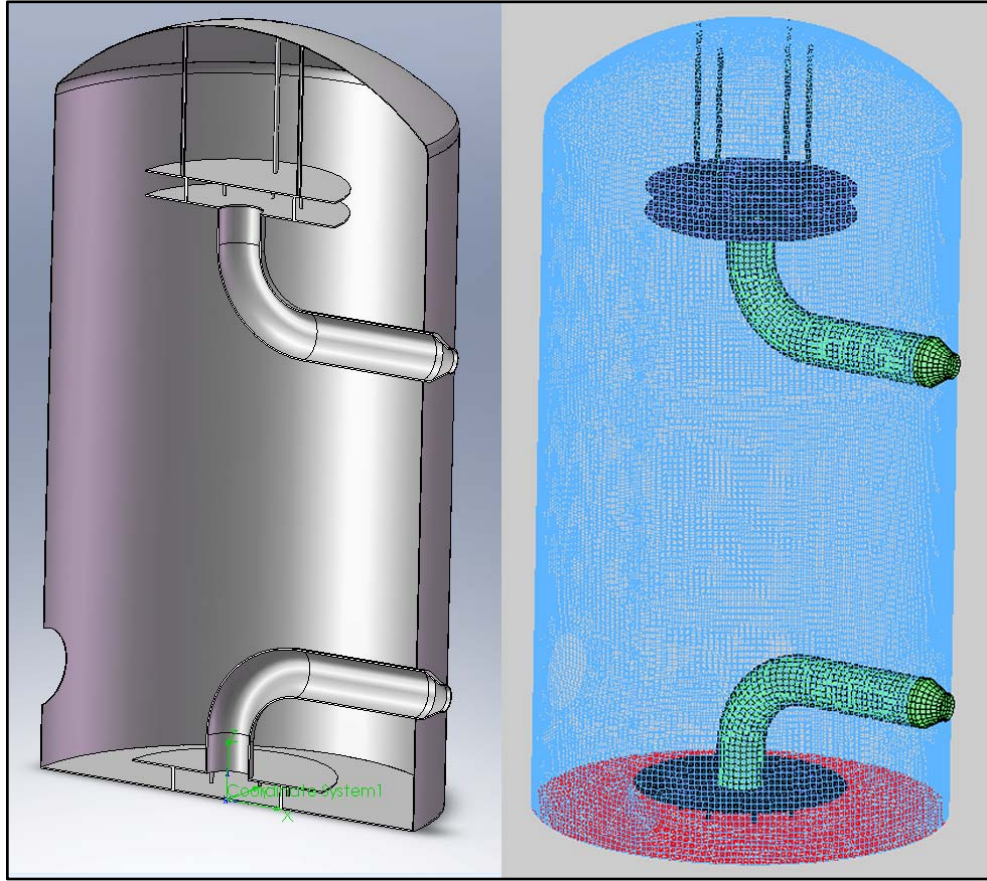
4.2.2 Sonlu eleman analizi

Sonlu eleman analizi (SEA) için kullanılacak modelin hazırlanmasında Bölüm 4.2'de tanımlı analitik yöntemler yardımı ile elde edilen et kalınlıkları kullanılmıştır. SEA modeli oluşturulurken analiz sırasında hesaba etkiyecek tüm detaylar (adam giriş deliği, termokupl, boru giriş – çıkış açıklıkları ve tank içi boru ile yayıcı ağırlıkları) model üzerinde tanımlanmıştır.

4.2.2.1 SEA modeli

Sonlu eleman modeli “Solidworks”te hazırlanmış, çözüm ağı “Altair HyperWorks”te oluşturulmuş ve analiz “Abaqus”te koşturulmuştur. SEA modelinde tank içerisindeki borular, yayıcı ve destek çubukları bulunmaktadır. Model, sekiz düğüm noktalı ikinci derece kabuk elemanlardan oluşturulmuştur. Çözüm ağı, 127.821 düğüm noktasından ve 42.598 elemandan meydana gelmiştir (Şekil 4.19). IDT'nin mukavemetine etki edecek büyüklükte olan açıklıklar (boru, termokupl, adam giriş deliği) hesaba katılmıştır. IDT'nin SEA modeli, tabandan tüm serbestlik derecelerinde yere sabitlenmiştir [27, 28].

SEA modelinin üst bölmesine azot basıncı (p_a) ve suyla temas eden alt bölmesine de azot basıncı ile yüksekliğe bağlı hidrostatik su basıncının (p_h) toplamı (p_t) statik yük olarak etki etmektedir (Şekil 4.20). Ayrıca, yer çekiminin etkisiyle IDT ve ona bağlı ekipmanların ağırlığı da analizde göz önünde bulundurulmuştur. Böylece, IDT üzerinde oluşacak gerilme ve yer değiştirme değerleri bulunur.



Şekil 4.19: IDT Modeli ve Oluşturulan Çözüm Ağı

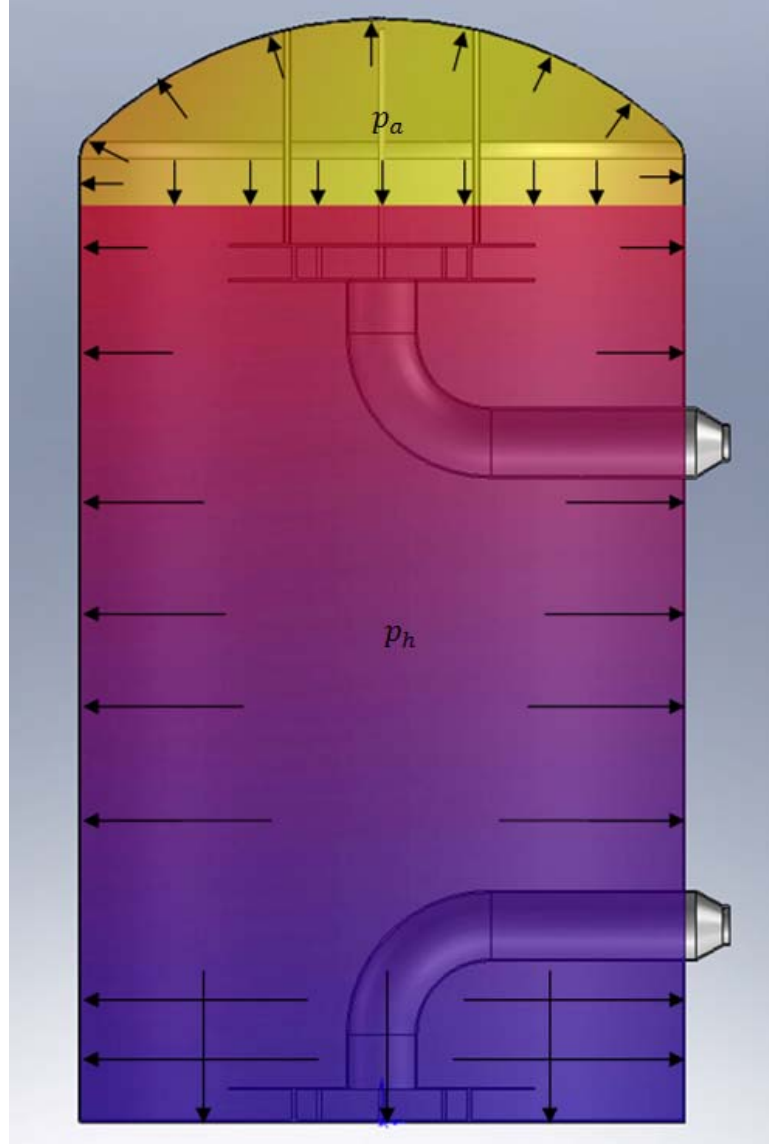
4.2.2.2 Gerilme ve yer değiştirme dağılımı

Statik gerilme analizi, Bölüm 4.2.1’de analitik yol ile hesaplanan kalınlıkların aşağıdakileri sağlamak amacı ile uygulanır.

- Aynı yükler altında tüm yapı boyunca izin verilen gerilme ve yer değiştirme değerlerini sağladığının görülmesi
- Yerel bölgelerde oluşması muhtemel gerilme yığılmalarının belirlenmesi
- Bu gerilme değerlerine karşı önlem alınmasını sağlamak amacı

Statik gerilme analizi sonucunda elde edilen gerilmeler yorumlanırken, asal gerilmelerden elde edilen Von Mises gerilmesi (Denklem 4.50) göz önüne alınmıştır.

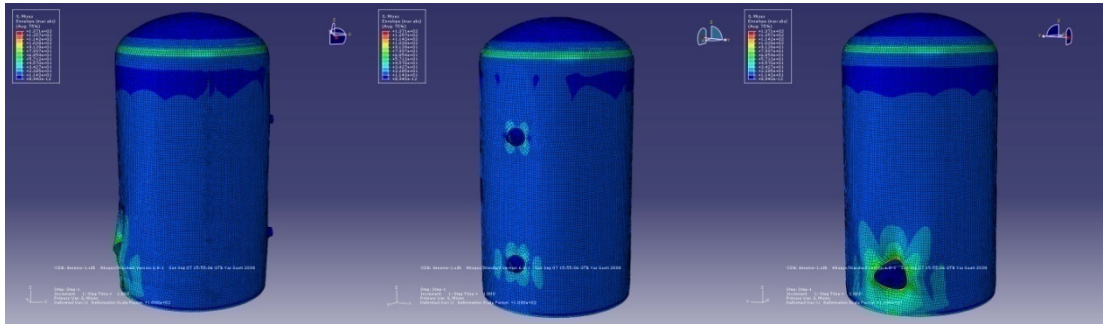
$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} < \sigma_{em} = \sigma_a/K \quad (4.50)$$



Şekil 4.20: IDT'e Etkiyen Mekanik Yükler

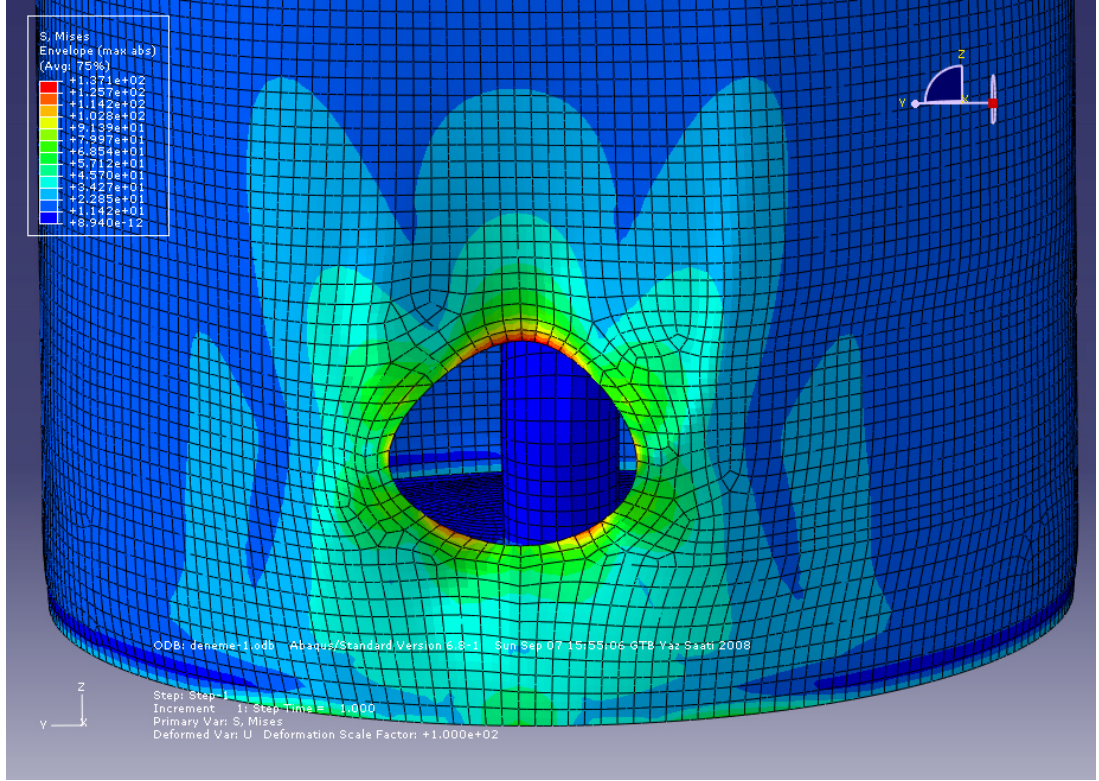
IDT tankı üzerinde oluşan asal gerilmelerden elde edilen Von Mises gerilmesi dağılımında kritik olan bölgeler aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekildeki gerilmeler yüz kat artırılmış halde gösterilmektedir.

IDT üstündeki farklı açılardaki gerilme dağılımı Şekil 4.21'de görülmektedir.



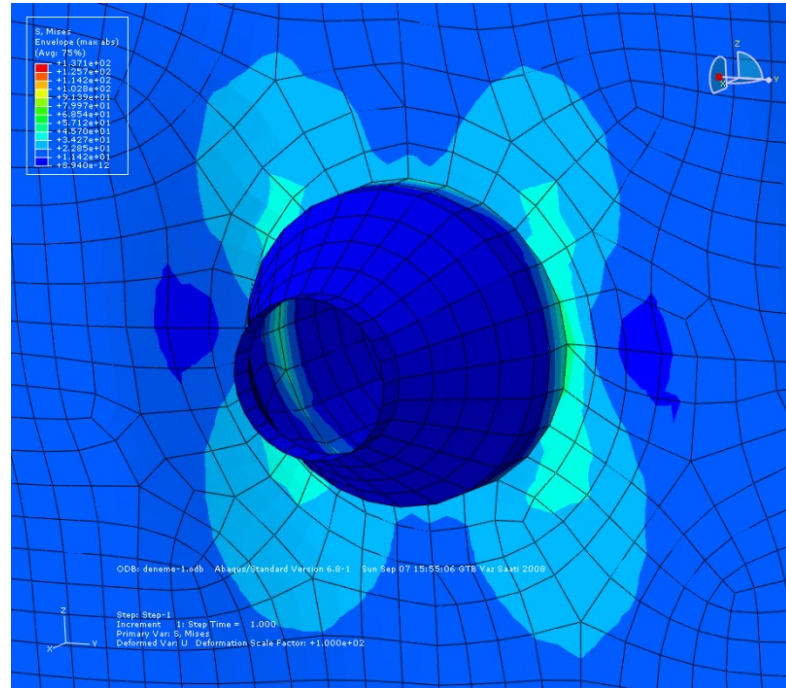
Şekil 4.21: IDT Üstündeki Gerilme Dağılımı

IDT üzerinde bulunan adam giriş deliği açıklığı çevresinde gerçekleşen gerilme dağılımı Şekil 4.22’de görülmektedir.



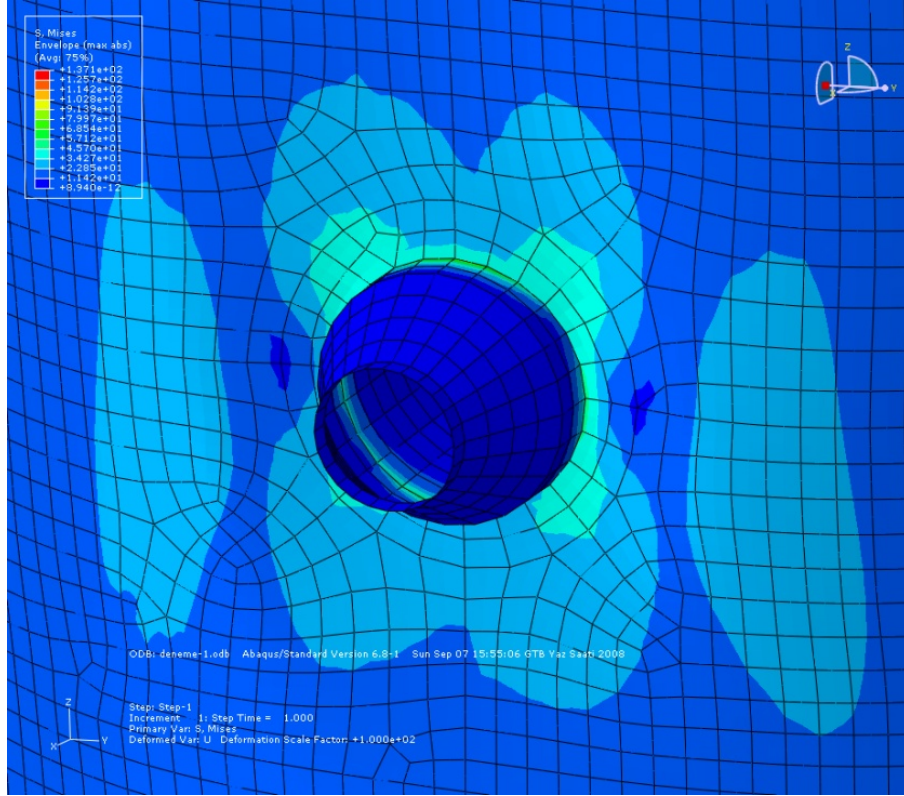
Şekil 4.22: Adam Giriş Deliği Çevresindeki Gerilme Dağılımı

Üst boru girişi açıklığı çevresinde gerçekleşen gerilme dağılımı Şekil 4.23’te görülmektedir.



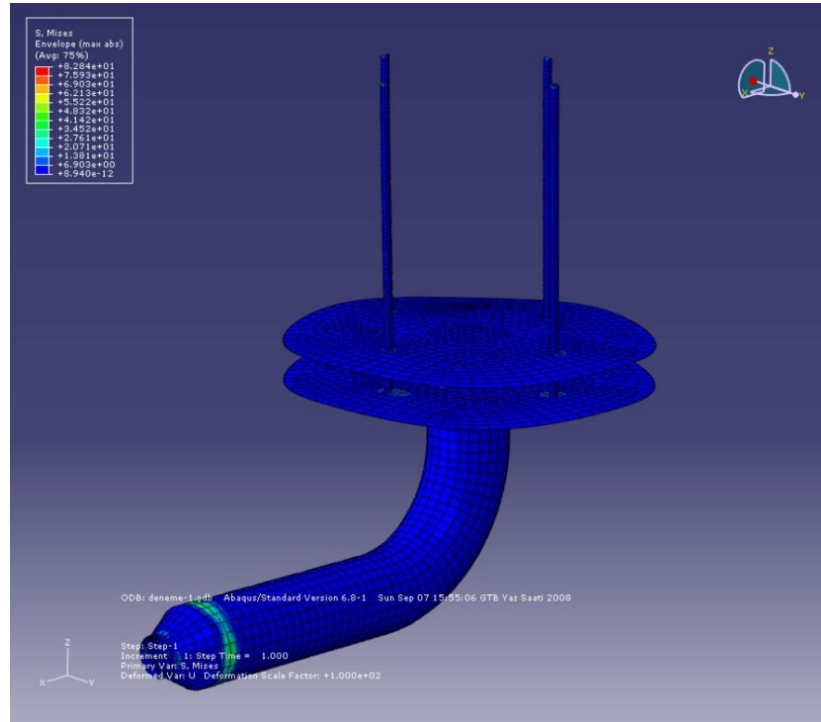
Şekil 4.23: Üst Boru Girişi Çevresindeki Gerilme Dağılımı

Alt boru girişı açıklığı çevresinde gerçekleşen gerilme dağılımı Şekil 4.24'te görölmektedir.



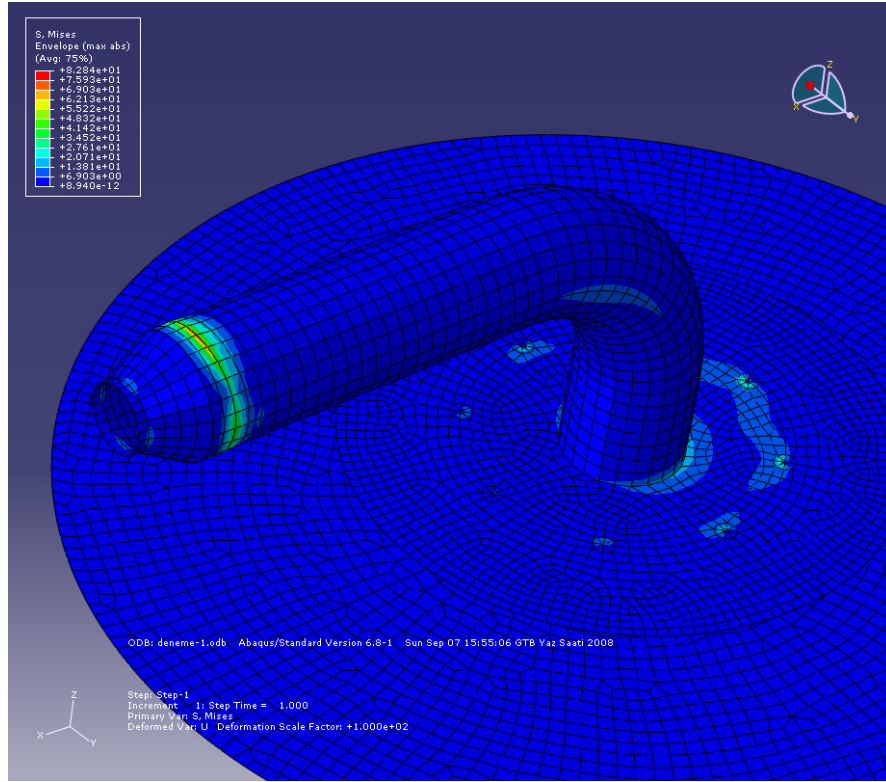
Şekil 4.24: Alt Boru Girişı Çevresindeki Gerilme Dağılımı

Üst yayıcı üzerinde gerçekleşen gerilme dağılımı Şekil 4.25'te görölmektedir.



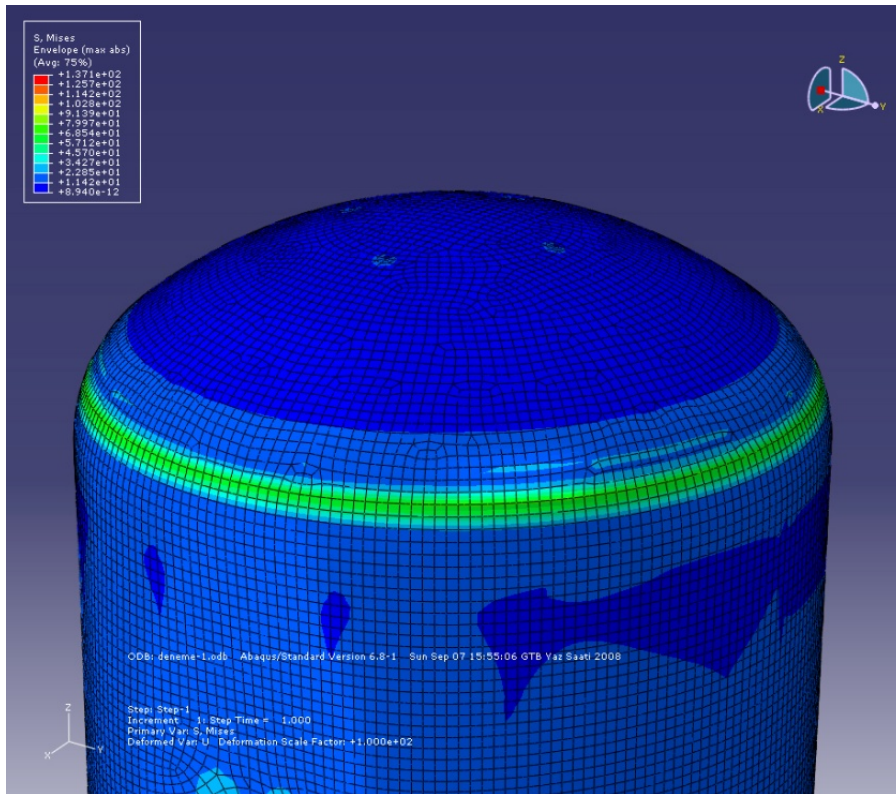
Şekil 4.25: Üst Yayıcı Üzerinde Gerçekleşen Gerilme Dağılımı

Alt yayıcı üzerinde gerçekleşen gerilme dağılımı Şekil 4.26'da görülmektedir.



Şekil 4.26: Alt Yayıcı Üzerinde Gerçekleşen Gerilme Dağılımı

Torisferik başlık üzerinde gerçekleşen gerilme dağılımı Şekil 4.27'de görülmektedir.



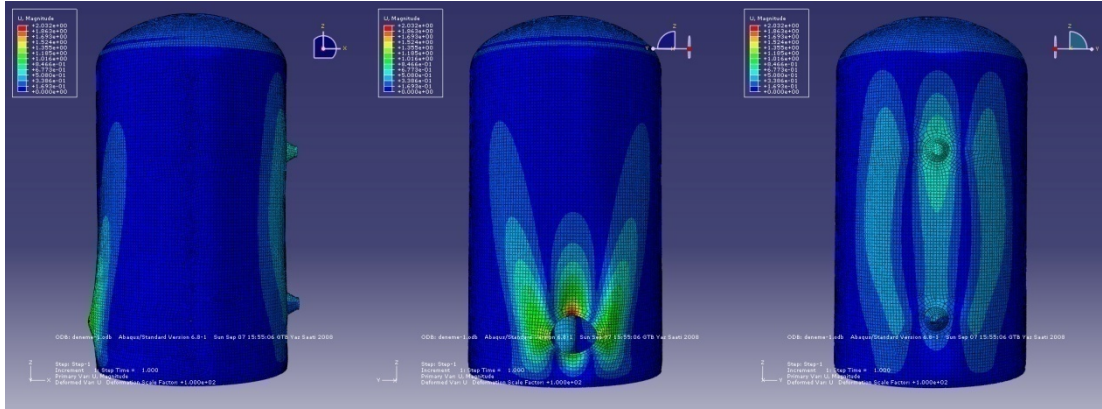
Şekil 4.27: Torisferik Başlık Üzerinde Gerçekleşen Gerilme Dağılımı

Alt ve üstteki giriş çıkış boru giriş çevresinde en yüksek, sırasıyla, 45,2 ve 46,9 MPa; alt yayıcıya bağlı borunun IDT'e girdiği bölmede en yüksek 60,8 Mpa; torisferik başlığın gövde ile birleştiği bölmede ise en yüksek 66,4 MPa gerilme oluşmuştur. IDT SEA modeli üstünde gerçekleşen en yüksek gerilmeler adam giriş deliği açıklığı çevresinde gerçekleşmektedir (126,620 MPa). Belirtilen azot gazı, hidrostatik su basıncı ve yer çekimi sonucu oluşan yükler altında IDT boyunca izin verilen gerilme değeri sağlanmaktadır (Tablo 4.7).

Tablo 4.7: IDT'de Gerçekleşen En Yüksek Gerilme Değerleri

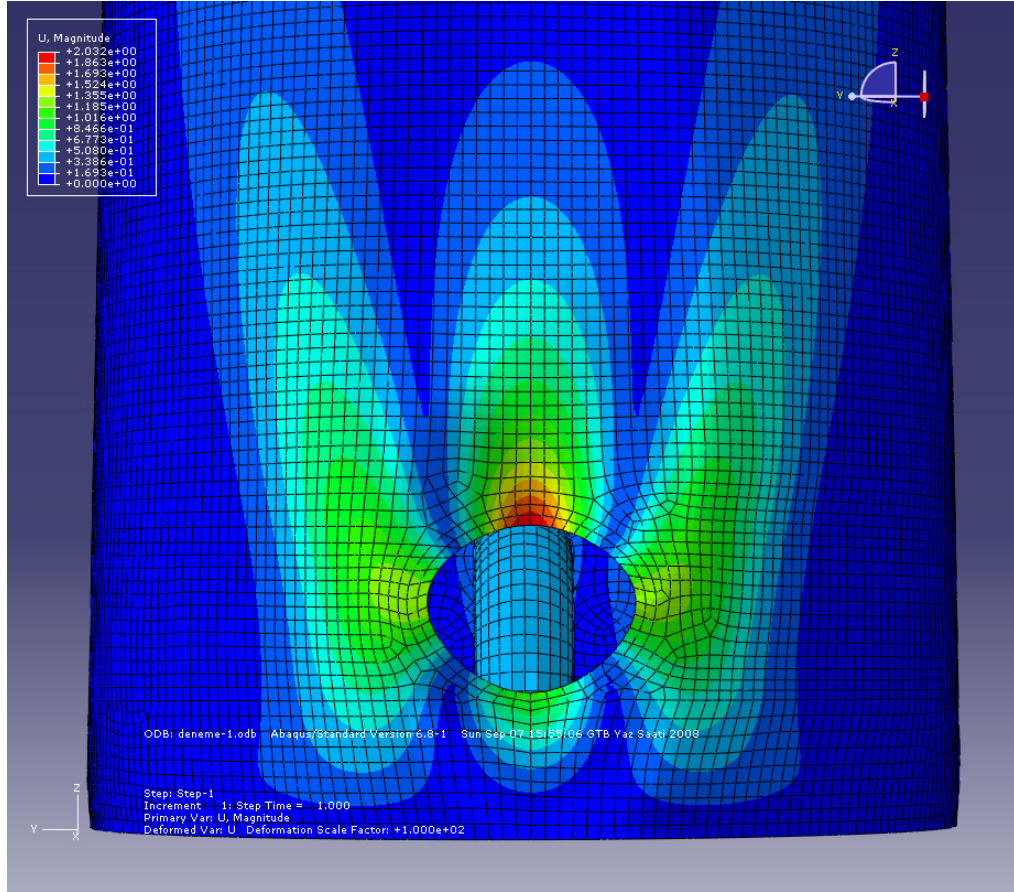
Konum	Gerilme Değeri [MPa]
Adam Giriş Deliği - Üst Çevresi	126,620
Adam Giriş Deliği - Diğer Çevre	114,085
Giriş Boru Çevresi - Alt	45,164
Giriş Boru Çevresi - Üst	46,853
Torisferik Başlık - Köşe	66,362
Alt Yayıcı – Boru	60,788

Altındaki şekillerde IDT'de gerçekleşen yer değiştirme dağılımı görülmektedir. IDT üstündeki farklı açılardaki yer değiştirme dağılımı Şekil 4.28'de görülmektedir. Yer değiştirmenin IDT üzerindeki açıklıklar çevresinde gerçekleştiği görülmektedir.



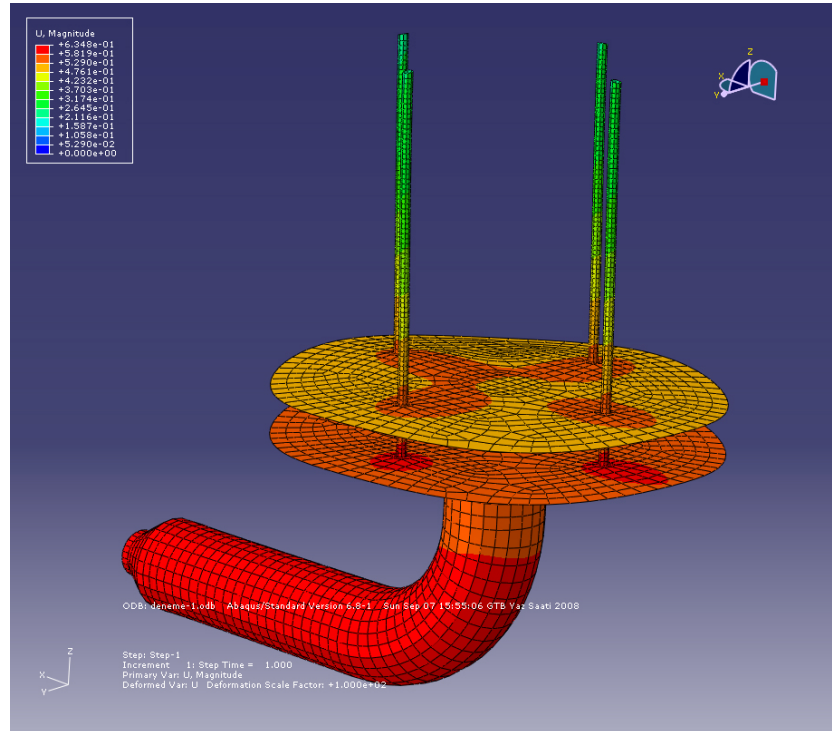
Şekil 4.28: IDT Üstündeki Yer Değiştirme Dağılımı

IDT üzerinde bulunan adam giriş deliği açıklığı çevresinde gerçekleşen yer değiştirme dağılımı Şekil 4.29'da görülmektedir.



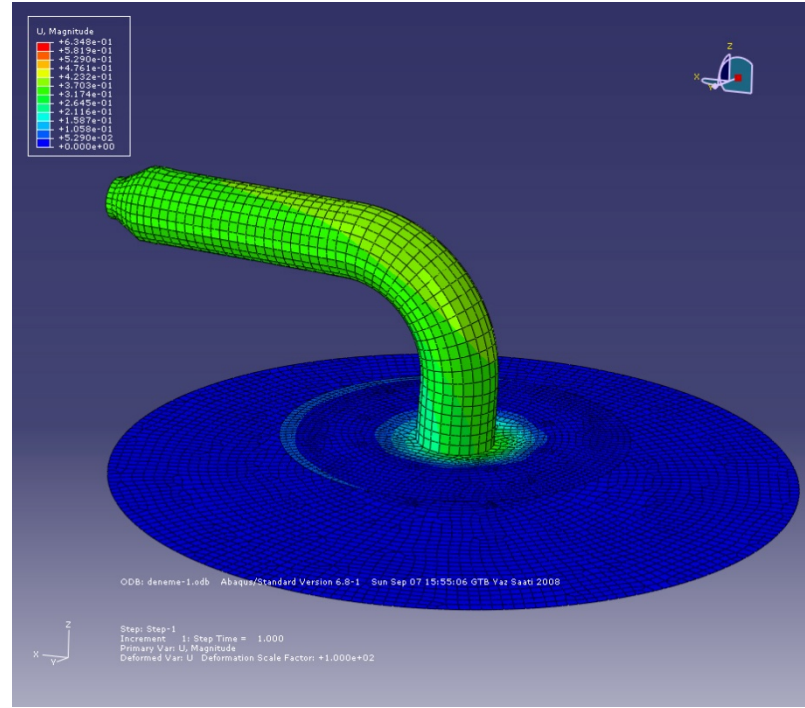
Şekil 4.29: Adam Giriş Deliği Çevresindeki Yer Değiştirme Dağılımı

Üst yayıcı üzerinde gerçekleşen yer değiştirme dağılımı Şekil 4.30'da görülmektedir.



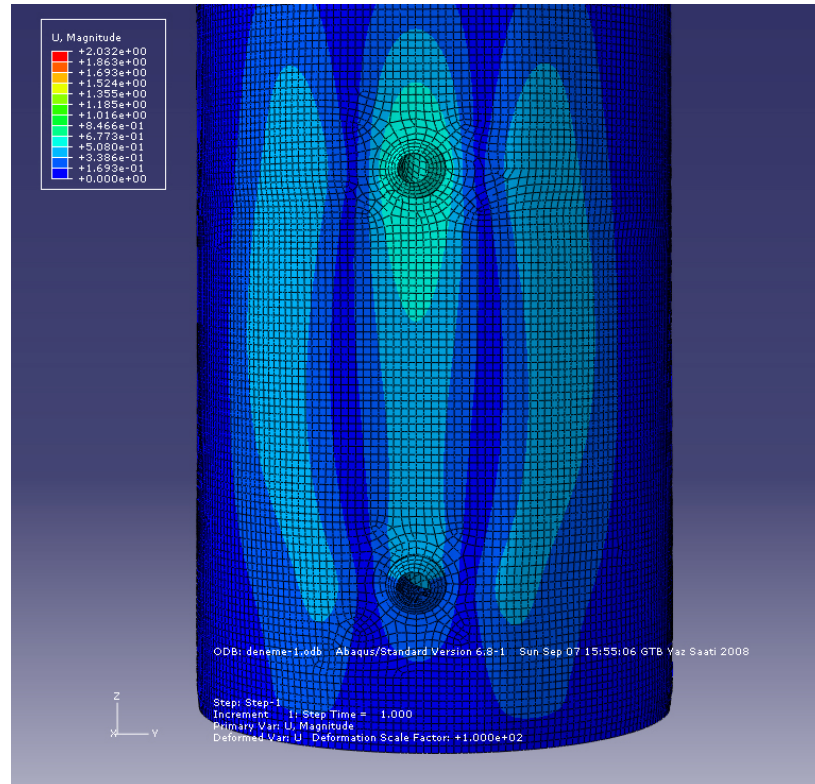
Şekil 4.30: Üst Yayıcı Üzerinde Gerçekleşen Yer Değiştirme Dağılımı

Alt yayıcı üzerinde gerçekleşen yer değiştirme dağılımı Şekil 4.31’de görülmektedir.



Şekil 4.31: Alt Yayıcı Üzerinde Gerçekleşen Yer Değiştirme Dağılımı

Şekil 4.32’de alt ve üst boru girişi açıklığı çevresinde gerçekleşen yer değiştirme dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.32: Alt ve Üst Boru Girişi Çevresindeki Yer Değiştirme Dağılımı

IDT’de gerçekleşen en büyük yer değiştirme miktarı (2,03 mm) adam giriş deliği açıklığı çevresinde gerçekleşmiştir.

4.2.3 SEA sonucu

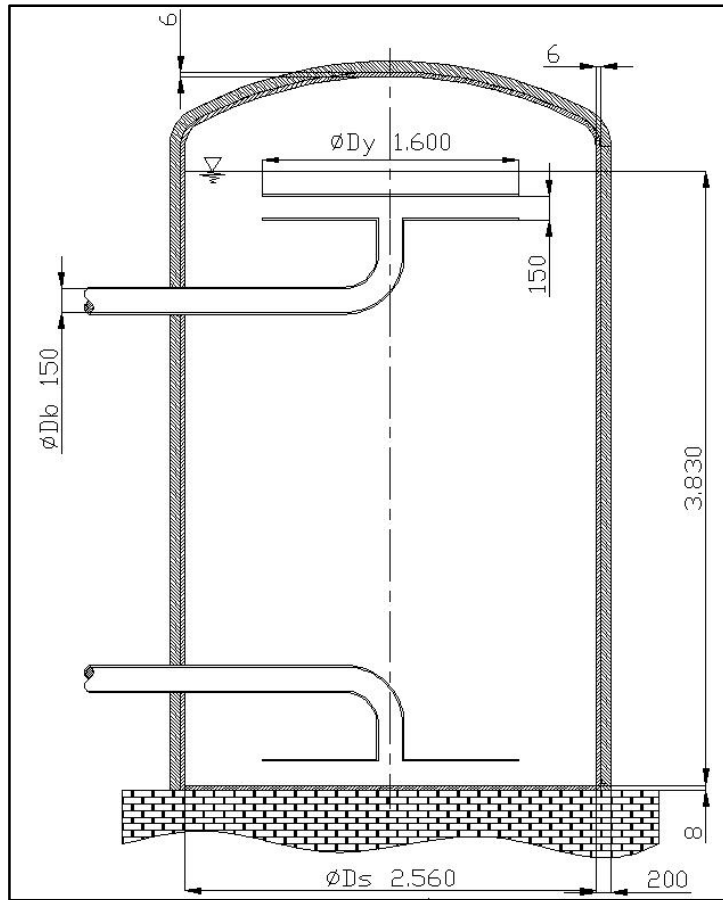
IDT SEA analizi sonuçları incelendiğinde gerilme ve yer değiştirmenin açıklıklar çevresinde arttığı görülmüştür. Açıklıklar arasında adam giriş deliği açıklığı çevresinde en yüksek gerilme ve yer değiştirme değerlerine ulaşılmıştır. En yüksek gerilme değeri (126,620) izin verilen gerilme değerinden ($\sigma_{em} = 162,4$ MPa) düşüktür.

4.3 IDT’nin Mekanik Boyutlandırması - Sonuç

IDT boyutlandırması üstte anlatıldığı şekilde yapılmıştır. Sonuç et kalınlığı değerleri Tablo 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4.8: Gövde, Torisferik ve Düz Başlık İçin Sonuç Et Kalınlık Değerleri

Gövde Et Kalınlığı	6	mm
Torisferik Başlık Et Kalınlığı	6	mm
Düz Başlık Et Kalınlığı	8	mm



şekil 4.33: IDT’nin Isıl ve Mekanik Boyutlandırması Sonucu

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizdeki fosil kaynakların çok uzak olmayan zamanda tükenecek olması kaynakların optimum oranda kullanılması ve tasarruf yapılması artık olağan görevden çok zorunluluk halini almıştır. Bu bilinçle ülkemizdeki termik santrallerin atık ısı potansiyellerinin ortaya çıkarılması ve atık ısının enerji ve ekserji bakımından verimli kullanımı için yerli imkanlara uygun BIG santrallerinin tasarlanması ve bu konuda uygulamaya geçilmesi hızlı bir çözüm yöntemi olacaktır. BIS tasarımı aşamasında IDS'nin de göz önünde bulundurulması ile nispeten düşük kurulum kapasitesinde BIG santrali tasarımı gerçekleştirilecektir. Ayrıca, IDS'nin BIS'de kurulması ile ısı arzı güvenliği sağlanmış olacak ve yedek kazanların kullanılması tamamen veya büyük oranda azalacağı için yakıt kullanımında, dolayısıyla işletme maliyetlerinde tasarruf sağlanacaktır [29].

Yapılan bu çalışma sonucunda; bir IDT'nin tasarımında izlenmesi gereken yol belirlenmiştir. BIS'a gereksinim duyulan kapasitede bir IDT tasarımı yapılacağına "Isı Depolama Sistemi Tasarımına Etki Eden Etkenler" öncelikle incelenmelidir. Kurulacak olan IDS'nin tasarım girdileri baz alınarak IDT tasarımının türü belirlenmelidir.

İlk etken olarak ısının depolanma türünün belirlenmesi gerekmektedir. Dünyadaki ısı depolama sistemlerine bakıldığında yaygın olarak ısı enerji depolayıcı akışkanın su olduğu sıcaklık katmanlaşmalı duyulur ısı depolama sistemleri, BIS'da kullanılmaktadır. Bunun sebebi; mevcut ısıtma sistemlerinde suyun kullanılması, suyun ucuz olması ve zararlı etkilerinin olmamasıdır. Daha sonra IDS'nin BIS iletim hattına bağlantı türünün belirlenmesi gerekmektedir. Direkt bağlantı, indirekt bağlantı ve eşanjörlü bağlantı türlerinden ekonomik olarak uygun olan bağlantı türü belirlenmeli ve tankın atmosferik mi yoksa basınçlı kap olarak mı tasarlanacağı bu bağlantı türüne göre ortaya çıkarılmalıdır. İlgili mevzuatlar ve tasarım girdileri göz önünde bulundurularak tankın küresel veya silindirik, dikey veya yatay ve tek veya çok depolu olması gerektiğine karar verilmelidir.

IDS'nin verimliliğini oluşturan yayıcı tasarımı ve IDT'nin yükseklik/çap oranı, literatür taraması sonucunda ve/veya tasarım girdileri göz önünde bulundurularak

belirlenmelidir. Yayıcının ve yükseklik/çap oranının daha sonra gerçekleştirilecek CFD analizleri ile gerçek boyutları bulunacaktır.

Tasarım etkenleri belirlendikten sonra IDS'nin konsept tasarım gerçekleştirilmiş olur. Bundan sonra IDT'nin ısı ve mekanik boyutlandırmasına geçilir. Isıl boyutlandırmada literatürden elde edilen bir boşaltma verimlilik ifadesi tanımlandıktan sonra CFD analizleri yapılarak ısıнын depolayacağı su ortamının ve yayıcının en yüksek verimliliği sağlayacak boyutlandırılması gerçekleştirilir. CFD analizleri farklı IDT yükseklik/çap oranı, farklı yayıcı çapı ve farklı giriş – çıkış borusu için gerçekleştirilmiştir. Bu incelemelerden çıkan sonuçlar; yükseklik/çap oranı arttıkça IDT'nin verimliliği artmaktadır, yayıcı plaka çapının IDT çapına oranı değerinin %60 – 63 mertebelerindeyken ve Reynolds sayısının 25.280 olduğu değerlerde en yüksek verimlilik görülmektedir. CFD analizi ile en yüksek verimliliğin olduğu ısı enerji depolayıcı su ortamının boyutlandırması gerçekleştirildikten sonra yalıtım kalınlığı hesaplanmalıdır.

Isıl enerji depolayıcı su ortamının boyutları belirlendikten sonra bu su ortamını muhafaza edecek tankın mekanik tasarımına geçilmelidir. Mekanik tasarımda izlenmek istenen standart doğrultusunda gövde ve alt – üst başlıkların et kalınlıkları analitik yöntemlerle belirlenmelidir. Daha sonra sonlu eleman analizi (SEA) gerçekleştirilerek belirlenen et kalınlıklarının mukavemeti, tank üstündeki açıklıklar da göz önünde bulundurularak kontrol edilmelidir. Bu tez çalışmasında yapılan analiz sonuçlarında, açıklıklar çevresinde en yüksek gerilmelerin olduğu görülmüştür. Tasarımı gerçekleştiren kişi açıklıklar çevresinde izin verilen gerilme değerinin aşılmadığına SEA analizleri ile dikkat etmelidir.

Bu tasarım adımları kullanılarak tasarım ihtiyacına uygun olarak IDT tasarımı gerçekleştirilir. Daha ileriki çalışmalarda şu konuların incelenmesi önerilebilir:

İmalatı gerçekleştirilen IDT'nin deneysel incelemeleri gerçekleştirilip CFD analizi ile deneysel veriler kıyaslanabilir.

100 °C'nin üstünde yüksek sıcaklıktaki ısı enerji depolayıcı akışkan olan suyun depolanmasıyla daha düşük hacimde daha fazla ısı enerji depolanması sağlanabilir. Mekanik olarak; farklı basınç sınıflarında IDT'nin mukavemet dayanımı ve IDS'nin kurulum ve işletme maliyeti ekonomik olarak incelenebilir.

IDT üstünde gerilmelerin yüksek çıktığı açıklıklar (adam giriş deliği, giriş – çıkış boru delikleri vb.) için uygun destek tasarımları gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Wit, J.D.**, 2007. Heat Storages for CHP Optimisation, *Power-Gen Europe*, PennWell, Madrid, 26 – 28 Haziran, 1-17.
- [2] **Kjær, M. and Aagaard, J.**, 2004. Heat Accumulators, *DBDH Hot|Cool*, **1**, 1-4.
- [3] **Dinçer, İ. and Rosen, A.R.**, 2002. Thermal Energy Storage Systems and Applications, pp. 259-270, John Wiley & Sons, England.
- [4] **Tol, H.İ. ve Ataş, S.**, 2008. Isı Depolama Sisteminin Detaylı Tasarımı, *TSAD Proje Raporu, R3-1*, TÜBİTAK MAM, Kocaeli.
- [5] *Heat accumulator tank, Funen Power Station, Odense C.* 2007. [online] [Erişim Tarihi 03 Şubat 2007]. İnternet Adresi: [http://www.promecon.dk/promecon/referencer.nsf/refweb/179FF8B74DAF4892C1256DFD002F0D4B/\\$file/Ref_221228_7310_UK.pdf](http://www.promecon.dk/promecon/referencer.nsf/refweb/179FF8B74DAF4892C1256DFD002F0D4B/$file/Ref_221228_7310_UK.pdf)
- [6] **Manczyk, H. and Leach, M.D.**. *Combined Heat and Power Generation and District Heating in Denmark: History, Goals, and Technology*. 2005. [online] [Erişim Tarihi: 05 Şubat 2007]. İnternet Adresi: <http://www.energy.rochester.edu/>
- [7] **Kirol, L. and Rockenfeller, U.**. *Thermal Energy Storage: Review of Technologies*. 2004. [online] [Erişim Tarihi: 23 Ocak 2007]. İnternet Adresi: <http://www.durabuild.org/html/9Publications/case%20studies/reports/CSreport-PCM%20ver%200.pdf>
- [8] **Stine, W.B. and Geyer, M.**. *Power From The Sun*. 2001. [online] [Erişim Tarihi: 06 Mart 2007]. İnternet Adresi: <http://www.powerfromthesun.net/book.htm>
- [9] *Business Activities: Generation*. 2006. [online] [Erişim Tarihi 26 Şubat 2007]. İnternet Adresi: <http://www.dongenergy.com/>
- [10] *Heating Plan Århus Kommune*. 2005. [online] [Erişim Tarihi 24 Şubat 2007]. İnternet Adresi: <http://www.aarhuskommune.dk/>
- [11] *Pressurised Heat Accumulator Tank*. 2007. [online] [Erişim Tarihi 03 Şubat 2007]. İnternet Adresi: <http://www.promecon.dk/>

- [12] Gimmelsberger, J., *Efficient Energy Supply (Electricity And District Heat) For The City Of Linz*. 2001. [online] [Erişim Tarihi 03 şubat 2007]. İnternet Adresi: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/industrie/IPPC_Konferenz/Gimmelsberger_.pdf>
- [13] **Sipilä, K.**, 2006. What Lies Ahead Finnish Overview, *Future Sustainable Heating Systems*, Rathcline Sustainable Projects Group, Longford, 24-28 Mayıs, 12.
- [14] **Kjær, S.**, 2003. Review of Super Critical Power Plant Technology, *CCT Roadmap Workshop*, ELSAM, Calgary, 20-21 Mart, 12-15.
- [15] **Nallusamy, N., Sampath, S. and Velraj, R.**, 2007. Experimental Investigation On a Combined Sensible and Latent Heat Storage Unit Integrated With Solar Water Heating System, *Renewable Energy*, **32**, 1206-1212.
- [16] *Phase Change Material*, 2008. [online] [Erişim Tarihi 05 Mart 2008]. İnternet Adresi: <http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_Change_Material>
- [17] **Lavan, Z. and Thompson, J.**, 1976. Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks, *Solar Energy*, **19**, 519-524.
- [18] **Streicher, W. and Bales, C.**, 2003. Phase Change Materials, *Solar Heating & Cooling*, IEA SHC, Avusturya, 7.
- [19] *Azot Battaniyeleme Sistemleri*, 2002. [online] [Erişim Tarihi 06 Mart 2008]. İnternet Adresi: <http://www.azot.gen.tr/azot_battaniyeleme.html>
- [20] **Altıntop, N., Kılık, Z., Özceyhan, V. and Kıncay, O.**, 2006. Effect of water inlet velocity on thermal stratification in a mantled hot water storage tank, *International Journal of Energy Research*, **30**, 163-169.
- [21] **Knudsen, S.**, 2002. Heat transfer in a "tank in tank" combi store, *Danmark Tekniske Universitet Rapport, DTU R-025*, DTU, Lyngby.
- [22] **Serth, R.W.**, 2007. Process Heat Transfer Principles and Applications, pp. 1-15, 44-70, Elsevier, Oxford.
- [23] **Grietzner, E.M., Spakovszky, Z.S. and Waitz, I.A.**, *Thermodynamics and Propulsion*, 2006. [online] [Erişim Tarihi 15 şubat 2008]. İnternet Adresi: <http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node123.html>

- [24] **Uztuğ, H.E.**, 2003. Basıncılı Kaplar El Kitabı, pp. 3, 7-9, 137-141, TMMOB, Ankara.
- [25] **Tiniş, F. and Bazman, F.**, 2005. Silindirik İnce Cidarlı Basıncılı Kolonların Artan Deprem Yüklerine Karşı Takviyelendirilmesi, *III. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Konya Şubesi, Konya, 16-17 Eylül, 1-18.
- [26] **Gill, S.S.**, 1970. The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Components, Pergamon Press, Oxford.
- [27] HyperWorks User's Manual (v.9.0).
- [28] Abaqus CAE User's Manual (v. 6.8).
- [29] **Tol, H.İ. ve Ataş, S.**, 2008. Kojenerasyon Sistemlerinde Isı Depolama Sisteminin Kullanılması, *14. Uluslar arası Enerji ve Çevre Teknoloji Sistemleri Fuar ve Konferansı*, ICCI 2008, İstanbul, 15-17 Mayıs, 298 - 303.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Mersin’de doğan Hakan İbrahim TOL, ilk, orta ve lise eğitimini Mersin’de yapmıştır. Çukurova Üniversitesi’nde başladığı yüksek öğrenim hayatına yatay geçiş yaparak İTÜ Makina Fakültesi’nde devam etmiştir ve 2005 yılında lisans eğitiminden mezun olmuştur. İTÜ Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Katı Cisimlerin Mekaniği programında yüksek lisans çalışmalarına ara vermeden devam etmiştir.

2006 yılında ilk iş hayatına atıldığı TÜBİTAK MAM’da “Termik Santrallerin Atık Isılarının Değerlendirilmesi (TSAD)” projesinde hala çalışmaktadır.