

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE İKLİM KOŞULLARINDAKİ VERİ MERKEZLERİNİN
SOĞUTULMASINDA EKONOMİZER KULLANIMININ ENERJİ
TASARRUFU VE EKONOMİK POTANSİYEL DEĞERLENDİRMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan GÖZCÜ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

MAYIS 2019

**TÜRKİYE İKLİM KOŞULLARINDAKİ VERİ MERKEZLERİNİN
SOĞUTULMASINDA EKONOMİZER KULLANIMININ ENERJİ
TASARRUFU VE EKONOMİK POTANSİYEL DEĞERLENDİRMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ozan GÖZCÜ
(503071610)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. İlker Murat KOÇ
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hamza Salih ERDEN**

MAYIS 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503071610 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ozan GÖZCÜ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TÜRKİYE İKLİM KOŞULLARINDAKİ VERİ MERKEZLERİNİN SOĞUTULMASINDA EKONOMİZER KULLANIMININ ENERJİ TASARRUFU VE EKONOMİK POTANSİYEL DEĞERLENDİRMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İlker Murat KOÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi



Eş Danışman : **Dr. Öğr. Üyesi Hamza Salih ERDEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi



Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Ayhan KURAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi M. İlteriş SARIGEÇİLİ
Çukurova Üniversitesi



Doç. Dr. Sinan Melih NİĞDELİ
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa



Teslim Tarihi : 03 Mayıs 2019
Savunma Tarihi : 27 Mayıs 2019



*Tam vazgeçmişken beni süt hakkıyla tehdit ederek cesaretlendiren anneme;
gecesini gündüzüne katarak hayatını ben ve çocuklarımıza adayan, yeri geldiğinde
evlatlarımızın tüm yükünü tek başına sırtlayan eşime
ve bu çalışma için beraber olabileceğimiz zamanlarımızdan çaldığım evlatlarım
Ali Hamza'm, Ravza'm ve Mirza'ma...*



ÖNSÖZ

Bu çalışmada Türkiye İklim Koşullarındaki Veri Merkezlerinin Soğutulmasında Ekonomizer Kullanımının Enerji Tasarrufu ve Ekonomik Potansiyel Değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuçlar, Türkiye’de 10 farklı şehir için çalıştırılan ve bu şehirlerin iklim verilerine göre değişkenlik gösteren soğutma ihtiyacına dinamik cevap verebilen modellerle elde edilmiştir.

Gerek gelişen teknolojik koşullar karşısında ülkemizin doğru ve proaktif pozisyon alabilmesi adına gerekse coğrafyamızda gittikçe yaygınlaşmakta olan veri merkezlerine, kurulum öncesi ve sonrası bir nebze olsun ılık tutabilmek adına çalışma yaptığım bu alanda beni cesaretlendiren danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. Hamza Salih Erden ve Prof. Dr. İlker Murat Koç Beylere teşekkürü bir borç bilirim.

Bunun yanında;

Özellikle ekonomik analiz çalışmaları safhasında sistemlerin ilk yatırım ve parça maliyetlerini belirleme noktasında karşılaştığımız zorlukları aşmamda önemli bir rol oynayan İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları Kitabı yayıncısı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’na,

Yüksek lisans çalışmalarına izin veren şirketim Türk Telekomünikasyon AŞ’ye ve birikimleriyle çalışmama destek veren tüm çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışma 115C133 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Mayıs 2019

Ozan Gözcü
Makine Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tanımlar	2
1.2 Veri Merkezi Temel Soğutma Altyapısı	3
1.2.1 Chiller.....	3
1.2.2 Soğutma kulesi.....	3
1.2.3 Pompalar	3
1.2.4 CRAH.....	3
1.3 Ekonomizer Yöntemleri	4
1.3.1 Doğrudan hava ekonomizeri (ASE).....	7
1.3.2 Dolaylı hava ekonomizeri (IASE).....	7
1.3.3 Dolaylı hava ekonomizeri – evaporatif destekli (IEC)	7
1.3.4 Dolaylı su ekonomizeri (WSE).....	7
1.4 Literatür Taraması	8
2. YÖNTEM.....	9
2.1 Modelleme.....	9
2.1.1 Veri merkezi.....	9
2.1.2 Chiller.....	9
2.1.3 CRAH.....	10
2.1.4 Pompalar	11
2.1.5 Soğutma kulesi.....	11
2.1.6 ASE	12
2.1.7 IASE.....	13
2.1.8 IEC	14
2.1.9 WSE	14
2.1.10 İklim kategorileri (şehirler).....	15
2.2 Model Entegrasyonu	16
2.2.1 BL.....	16
2.2.2 ASE	16
2.2.3 IASE.....	18
2.2.4 IEC	19
2.2.5 WSE	20
2.3 Kabuller	21

2.4 Toplam Sahip Olma Analizi	22
2.4.1 Toplam sahip olma (TSO) analizi yöntemleri.....	23
2.4.1.1 Net bugünkü değer yöntemi	23
2.4.1.2 İç kârlılık (verim) oranı yöntemi.....	24
2.4.1.3 İndirgenmiş geri ödeme süresi yöntemi	25
2.4.2 İlk yatırım maliyetleri.....	25
2.4.3 Bakım maliyetleri.....	26
2.4.4 Enerji maliyetleri.....	27
2.4.5 Su maliyetleri	28
2.4.6 İşçilik maliyetleri.....	29
2.4.7 Oranlar.....	29
2.4.7.1 İndirgeme (iskonto) oranı.....	29
2.4.7.2 Enflasyon oranı	30
2.4.8 Ekonomik ömür.....	30
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
3.1 Enerji Tüketimi.....	31
3.2 Ekonomik Analiz.....	39
4. SONUÇ	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ	51

KISALTMALAR

ADA	: Adana
ANK	: Ankara
ANT	: Antalya
ASE	: Doğrudan Hava Ekonomizeri (Air-side Economizer)
ASEFAN	: Hava Ekonomizeri Fan Gücü
ASHRAE	: Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği (American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers)
BL	: Geleneksel (Baseline)
BOL	: Bolu
BP	: Bypass
CHWPUMP	: Soğutulmuş Su Pompası Gücü
COP	: Performans Katsayısı (Coefficient of Performance)
CRAH	: Sunucu Odası Hava Soğutucusu (Computer Room Air Handler)
CRAHFAN	: CRAH Ünitesi İçerisindeki Fan Gücü
CT	: Soğutma Kulesi (Cooling Tower) Fan Gücü
CWPUMP	: Soğutma Suyu Pompası Gücü
ÇŞB	: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
DİKO	: Değiştirilmiş İç Kârlılık Oranı
DIY	: Diyarbakır
EPDK	: Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
ERZ	: Erzurum
H	: Kapalı Koridor
HUMID	: Nemlendirici (Humidifier) Pompa Gücü
HVAC	: Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme (Heating Ventilating Air Conditioning)
HX	: Isı Değiştirici (Heat Exchanger)
IASE	: Dolaylı Hava Ekonomizeri (Indirect Air-side Economizer)
IEC	: Dolaylı Evaporatif Soğutma (Indirect Evaporative Cooling)
IT	: Bilgi Teknolojileri (Information Technologies)

İKO	: İç Kârlılık Oranı
İST	: İstanbul
İZM	: İzmir
Kr	: Kuruş
L	: Açık Koridor
MERV	: Minimum Efficiency Reporting Value
MISC	: Çeşitli Güçler (Miscellaneous Power)
NBD	: Net Bugünkü Değer
OG	: Orta Gerilim
PUE	: Güç Kullanım Etkenliği (Power Usage Effectiveness)
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TL	: Türk Lirası
TSO	: Toplam Sahip Olma
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)
VM	: Veri Merkezi
WSE	: Dolaylı Su Ekonomizeri (Water-side Economizer)

SEMBOLLER

a	: Sabit Katsayı
ch	: Chiller
d	: Tasarım (Design)
db	: Kuru Termometre
F	: Fayda
M	: Yatırım
m	: Yatırımın Tamamlanma Süresi
n	: Yıl
o	: Dış Ortam (Outside)
P	: Güç
r	: İç Kârlılık Oranı, Dönüş (Return)
s	: Besleme (Supply)
T	: Sıcaklık
Y	: Normalize Edilmiş Sıcaklık Farkı
X	: Kısmi Yük Oranı
W	: Yük
wb	: Islak Termometre
Δ	: Fark
ε	: Isıl Etkenlik
Z	: Chiller Güç Oranı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Tier sınıfı özellikleri.....	2
Çizelge 2.1 : 10 şehrin iklim sınıfları ve yıllık ortalama sıcaklık değerleri.	15
Çizelge 2.2 : Sistem ve bileşenleri için kabul edilen ve hesaplanan değerler.	22
Çizelge 2.3 : İlk yatırım maliyetleri çizelgesi (TL).	26
Çizelge 2.4 : Yıllık bakım giderleri çizelgesi (TL).	27
Çizelge 2.5 : İllere göre Aralık 2016 dönemi şebeke suyu birim fiyatları (TL/m ³). .	28
Çizelge 2.6 : 2004-2016 yılları arasında gerçekleşen yıllık enflasyon oranları (%).	30
Çizelge 2.7 : Serbest soğutma sistemi bileşenleri ve ekonomik ömürleri.	30



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Veri merkezlerinde kullanılan elektronik cihazlar için ASHRAE tarafından önerilen işletme şartları [11].	4
Şekil 1.2 : Temel Bileşenler : (a)Geleneksel, (b)Doğrudan Hava, (c)Dolaylı Hava ve (d)Dolaylı Su Ekonomizeri	6
Şekil 2.1 : Geleneksel (BL) model bileşenleri.....	16
Şekil 2.2 : Doğrudan hava ekonomizeri (ASE) model bileşenleri.....	17
Şekil 2.3 : Dolaylı hava ekonomizeri (IASE) model bileşenleri.	19
Şekil 2.4 : Dolaylı hava ekonomizeri – evaporatif destekli (IEC) model bileşenleri.....	20
Şekil 2.5 : Dolaylı su ekonomizeri (WSE) model bileşenleri.....	21
Şekil 2.6 : Elektrik birim fiyat çizelgesi [48].	27
Şekil 2.7 : Yıllara göre elektrik birim fiyat değişimi (Kr / kWh).	28
Şekil 2.8 : Yıllara göre asgari ücret değişimi (TL).....	29
Şekil 3.1 : BL-L veri merkezinin İstanbul için yıllık enerji sarfiyatı dağılımı.	31
Şekil 3.2 : Geleneksel veri merkezi (BL) için <i>PUE</i> değerinin 10 şehirde değişimi. .	32
Şekil 3.3 : BL-L'ye göre İstanbul'daki farklı sistemlerin enerji sarfiyatları.	33
Şekil 3.4 : BL-L'ye göre ASE-L'nin enerji tüketimi ve <i>PUE</i> değerleri.....	34
Şekil 3.5 : BL-L'ye göre IASE-L'nin enerji tüketimi ve <i>PUE</i> değerleri.....	34
Şekil 3.6 : BL-L'ye göre IEC-L'nin enerji tüketimi ve <i>PUE</i> değerleri.	35
Şekil 3.7 : BL-L'ye göre WSE-L'nin enerji tüketimi ve <i>PUE</i> değerleri.....	36
Şekil 3.8 : BL-L'ye göre ekonomizer yöntemlerinin enerji tasarrufu değerleri.	37
Şekil 3.9 : Türkiye'nin 40 şehri için yıllık chiller çalışma saatleri yüzdesi.	37
Şekil 3.10 : BL-L'ye göre ekonomizer yöntemlerinin su tüketim değerleri.....	38
Şekil 3.11 : BL'ye göre ekonomizer yöntemlerinin İST nakit akış diyagramı.....	39
Şekil 3.12 : a) <i>NBD</i> (Milyon TL), b) <i>DİKO</i> (%), c)Geri ödeme süresi (yıl).	40



TÜRKİYE İKLİM KOŞULLARINDAKİ VERİ MERKEZLERİNİN SOĞUTULMASINDA EKONOMİZER KULLANIMININ ENERJİ TASARRUFU VE EKONOMİK POTANSİYEL DEĞERLENDİRMESİ

ÖZET

Veri merkezleri gibi yüksek yoğunlukta elektriksel yük ve soğutma ihtiyacı bulunan tesislerde mekanik soğutma altyapısının enerji tüketimi, toplam tüketimin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Serbest soğutma sistemleri, belirli koşullar altındaki dış hava şartlarını kullanarak mekanik soğutma ihtiyacını tamamen karşılayabilmekte veya azaltabilmektedir. Bu çalışma veri merkezi soğutma altyapısının kısmi yük performansı ve değişken iklim şartlarına duyarlı termodinamik modelleri hakkında genel bir bakış sunmaktadır. Bu modeller yaygın olarak kullanılan Doğrudan Hava Ekonomizeri (ASE), Dolaylı Hava Ekonomizeri (IASE), Dolaylı Evaporatif Soğutmalı (IEC) ve Dolaylı Su Ekonomizeri (WSE) gibi dört ayrı serbest soğutma sistemini kapsamaktadır. Referans olarak bilişim teknolojisi (BT) teçhizatının 1 MW elektriksel yüke sahip olduğu tipik hava soğutmalı bir veri merkezinin termodinamik modeli (BL) kabul edilmiştir. Türkiye'nin 10 farklı şehrindeki iklim şartlarında gerçekleştirilen yıllık enerji hesaplamalarına göre, farklı serbest soğutma yöntemlerinin BL veri merkezine olası iyileştirme uygulamaları olarak etkileri elde edilmiştir. Şehirler belirlenirken şehrin nüfus yoğunluğu, ülke ekonomisine katılım etkisinin yanı sıra iklim çeşitliliğinin sağlanması gibi kısıtlar da dikkate alınmıştır. Enerji tüketim değerlerinin yanı sıra sistemlerin 15 yıllık ekonomik kullanım ömrü gözetilerek toplam sahip olma analizi (TSO) çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada ekonomik analiz yöntemleri ile hangi şehirde hangi sistemin seçiminin iyileştirme çalışmaları kapsamında daha uygun olacağı belirlenmiştir. Sadece enerji tasarrufu değerleri irdelendiğinde açık koridorlu sistemler için ASE en başarılı sonuçları verirken, daha yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı sağlayan kapalı koridorlu sistemlerde ibre IEC lehine dönmüştür. Sonuçlara toplam sahip olma (TSO) analiz yöntemleri ile elde edilen çıktılar eklendiğinde ise ilk yatırım maliyetinin diğer sistemlere göre çok aşağılarda kalmasının avantajı ile WSE değiştirilmiş iç kârlılık oranı (DİKO) en yüksek yöntem olarak ön plana çıkmıştır. Net bugünkü değer (NBD) yöntemine göre yapılan değerlendirmede ise 15 yıllık ekonomik kullanım ömrü için ASE ve IEC en değerli yatırım opsiyonları olarak görülmektedir. Sonuçlar göstermiştir ki toplam sahip olma (TSO) analizi olmaksızın salt enerji tasarrufu sonuçlarına bakarak alınacak kararların işletmelerin beklenmedik sonuçlarla karşı karşıya kalmalarına neden olması muhtemeldir.



ENERGY SAVINGS AND ECONOMIC POTENTIAL ASSESSMENT OF ECONOMIZER USE FOR COOLING DATA CENTERS IN TURKEY'S CLIMATE CONDITIONS

SUMMARY

By technological developments, collecting, protecting, processing, and accessing data are getting more critical. Data centers are the places where valuable data are kept for the actions mentioned above. Data center sector has an annual growth rate of about 10% with a global energy consumption share of about 3%. Considering the limited energy sources and increasing costs in data centers, energy efficiency has been an increasing concern for the industry. Mechanical cooling infrastructure energy consumption constitutes a significant fraction of the total energy consumption in facilities like data centers with high-density electrical load and cooling demand. Free cooling systems can eliminate or reduce the need for mechanical cooling by utilizing ambient conditions under certain circumstances. Thus, by free cooling methods (economizers), we aim to reduce the use of compressor-based cooling, which is the primary consumer of energy in the data center cooling infrastructure. Due to the increased concerns about the energy efficiency of data centers, economizers are becoming an integral part of the data center cooling infrastructure. While utilizing economizers in data centers, it is essential to maintain reliable and sustainable operations. Thermodynamic models that capture the off-design performance of key equipment are required to simulate the energy performance of data center cooling infrastructure and various economizer modes.

This study presents an overview of thermodynamic models for data center cooling infrastructure that are sensitive to the part-load performance and dynamic climate conditions. The thermodynamic model of a typical air-cooled data center with 1 MW electrical load from IT equipment, is assumed to be the baseline (BL) data center. Based on annual energy calculations executed with the climate conditions of 10 different cities in Turkey, the energy and economic impacts of various free cooling methods on the BL data center as retrofit application have been obtained. These models include widely used free cooling systems such as Direct Air-side Economizer (ASE), Indirect Air-side Economizer (IASE), Indirect Evaporative Cooling (IEC) and Indirect Water-side Economizer (WSE). Climate conditions affect the performance of free cooling modes. It also affects the performance of the main components of the cooling infrastructure indirectly due to inefficiencies caused by the part load operation during free cooling modes. In addition to the energy consumption amounts, total cost of ownership (TCO) analysis of systems are performed considering a 15-year life cycle. For the total cost of ownership analysis of systems, various metrics such as net present value (NPV), modified internal rate of return (MIRR) and discounted payback period methods are used. With the help of economic analysis methods, for each city, the most proper systems as a retrofit application are determined. Energy savings are not sufficient to make an investment decision. Both economic aspects and energy saving potential results should be considered for a proper decision. In a conventional air-cooled data center, server cabinets (i.e., racks) are arranged to form hot and cold aisles. Computer Room Air Handling Unit (CRAH) fans supply cold air into the pressurized raised floor plenum. Cold air emanates from the perforated tiles in the cold aisle mixes with some recirculated room air and enters racks. The air temperature at the rack exit is higher due to the dissipated heat by the IT equipment. Hot exhaust is collected in

hot aisles before returning to CRAH units to reject heat into a chilled water stream supplied by a chiller via an air-to-water cross-flow heat exchanger (HX). Baseline (BL) data center equipped with a water-cooled chiller that is coupled with a cooling tower on the condenser side to reject the heat to the environment. ASE allows outside air in, when the ambient environmental conditions permit. On the other hand, ASE poses an increased risk of contamination for the IT equipment. ASHRAE recommends filtering outside air to reduce gaseous contaminants with gas-phase filtration systems and particulates with MERV 11 or 13 filters, especially for data centers with ASE. Use of additional filters is a source of increased fan power. Indirect air-side economizer (IASE) mitigates most of the abovementioned contamination risks ASE poses by isolating outside air and data center return air. Warm return air exchanges heat with the outside air across the surface of an air-to-air cross-flow HX when it is sufficiently cold outside. Inefficiencies in the IASE configuration primarily stem from the limiting heat transfer effectiveness less than unity and increased fan power to overcome the high flow resistance of the HX. Similar to IASE, IEC also isolates indoor and outdoor air streams. IEC allows more efficient heat transfer than that in IASE by continuously keeping outside surface of IEC HX wet to enhance heat transfer through adiabatic cooling. The indirect WSE configuration includes a plate-frame HX separating the condenser water and chilled water loops. The HX takes advantage of cold water supplied by the cooling tower to indirectly cool the chilled water. A WSE system can be configured to operate in both parallel and series with the existing chiller. Enclosing the aisle is a common approach to improve the efficiency of air-cooled data centers. Enclosed-aisle (EA) data centers decrease the temperature non-uniformity across the servers and allow higher temperature operation that leads to more number of hours economizer operate.

Results indicate that operating the DC at a higher temperature (BL-H) leads to roughly 15% energy savings. Overall, higher temperature operation provides favorable results in all cases. Current results for ASE-L indicate the reduced need for humidification due to the relaxed lower limit of recommended humidity by the ASHRAE. This modification increased the energy efficiency of the ASE in cold cities like Erzurum (ERZ). IEC configuration can lead to the elimination of mechanical cooling entirely in most of the climates except hot climates considering that data center operators allow higher temperature operation via aisle containment strategies. IEC-H is the best performer among the ten cities. Greater than 50% cooling energy savings are observed with IEC even in warm climates. Energy-saving potential by IEC leading to less than 10% of annual chiller hours across Turkey and less than 1% in half of the 10 cities studied, especially in enclosed aisle DCs. Warmer locations in the southern coastal areas like ANT and ADA depend on the chiller operation for at least 60% of the time for all OA configurations. ERZ is the only city to achieve chiller operation of less than 10% of the time with ASE and OA configurations. On the other hand, higher temperature operation via EA configuration dramatically improves the potential of energy savings, leading to as much as 54% additional annual hours without the need for a chiller. Except cities in the warm regions in the southern coastal areas (e.g., ADA and ANT) and humid northern coastal areas, all cities resulted in less than 10% of annual chiller operating hours with the IEC method in the EA configuration. Other free cooling methods may still require mechanical cooling. Unlike the IEC, where evaporative cooling removes heat directly from the DC air, the process in the WSE produces cold water at the cooling tower that absorbs heat from the chilled water stream. Due to the indirect nature of the evaporative cooling process, results indicate relatively lower performance by the WSE compared to other methods for OA

configurations, which is in line with the literature. Relaxed humidity requirements significantly helped ASE configuration to reduce humidification energy consumption, especially in cold climates. However, upper limits on humidity exhibit an energy efficiency bottleneck for ASE. Therefore, systems that indirectly utilize ambient conditions show more improvement in energy efficiency at higher operating temperatures. ASE gave the most successful results for open aisle case, whereas indirect evaporative cooling (IEC) systems forged ahead in enclosed aisle systems that allow higher temperature operation. The variations in the ambient dry bulb temperatures have a significant impact on the performance of IASE-L due to the sensible heat exchanging process. The additional fans to overcome the flow resistances of IASE HX and filters lead to a considerable amount of fan power beyond the existing CRAH fans. Since DC and ambient are isolated, there is no humidification requirement in IASE. The IEC performs better than IASE due to the enhanced heat transfer via evaporative cooling. Water consumption can also be a significant cost factor. CTs, IEC HX, and humidifiers consume water. The WSE method stands out as the most aggressive consumer of water due to the heavy use of CTs. That is why the availability of water is also worth considering for WSE applications. Even though the IEC depends on an evaporative cooling process, the associated increase in water consumption is negligible because of the reduced number of chiller hours. ASE, IASE, and IEC require air-handling units integrated with CRAH units. Contrarily, WSE requires modifications of the chilled and condenser water circuits and installation of the WSE HX in between, which allows for both a cost-effective and operationally less disruptive investment. If DC operators are reluctant to see higher temperature operation (EA), and they can take measures to mitigate contamination risks, ASE may be a decent free cooling approach. IEC is the better option among indirect air-side economizers (IASE and IEC), primarily due to more efficient HX with evaporative cooling. The operational cost reduction is far more significant than the slight increase in the capital and maintenance cost for the IEC configuration.

After adding the outputs of TCO calculations to the energy saving results, WSE came forward as the system with the highest internal rate of return (IRR) due to the relatively low initial investment cost. However, despite greater energy-saving potential, IEC has more extended payback periods of 1,4 to 3,7 years due to the high capital investment compared with those of ASE and WSE with less than 1,4 years. In the assessment based on the criterion of net present value (NPV), ASE and IEC appear to be the most valuable options for the 15-year of life cycle. All cases in IST lead to payback periods of less than four years and NPVs greater than 2,5 million TL in 15 years of lifetime. The results indicate similar cash flows for ASE-L and ASE-H, which is due to the higher cost savings by ASE-L with respect to BL-L than that by ASE-H with respect to BL-H. NPV values of IEC are the best in all cities for EA cases. For all cities except ERZ and VAN (where WSE-L is comparable to IEC-L), ASE-L and IEC-L, present higher NPV values among OA configurations. The impact of regional water consumption on the NPV can be seen especially in cities like ANK where water costs are high. To illustrate, even though ANK is not the best regarding energy consumption, NPV is better than that of ERZ in some cases, especially for EA, due to the high price of water in ANK. Depending on the company policies, discount rates may vary and lead to different NPVs. MIRR values give hints about the effect of the discount rates on the feasibility of applications. For instance, a slight increase of up to 10%–15% of discount rate may lead to unfavorable NPV for the retrofit applications of IASE in ANT and ADA. Similarly, IEC is an unfavorable option for companies seeking high rates of return with payback times of less than a year.

Overall results show that companies may end up with unexpected results eventually, if decisions are made by considering energy saving results solely without TCO analysis. It is important to note that the economic analysis of enclosing the aisle is not within the scope of this study. Future work may include the analysis of other free cooling methods applicable to legacy and other types of data centers as well as waste heat recovery methods for emerging liquid-cooled data centers.



1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile beraber gerek ülkemizde gerekse dünya genelinde bilgini/verinin elde edilmesi, depolanması ve gerektiğinde ulaşılabilir olması şirketler için giderek önem kazanmaktadır. Günümüzde kurumlara bilişim teknolojileri hizmeti sağlayan (veriyi depolayan, koruyan, mümkün olan her an ulaşılabilir kılan) altyapı, veri merkezi olarak adlandırılan yapılar içerisinde muhafaza edilmektedirler. Bu yapılar küçük odalardan on binlerce metrekairelik alanlara kadar değişiklik gösterebilmektedirler [1]. Küresel büyüme oranı %10,7 olan veri merkezi sektörü [2], dünya enerji tüketiminin %3'ünü oluşturmaktadır [3]. Türkiye veri merkezi sektörü, küresel kapasitenin %0,4'ü [4], veri merkezi yatırımlarının ise %1'ine [5] sahip olsa da, son yıllarda düzenli olarak %30'un üzerinde artış gösteren büyüme ve enerji kullanım oranları ile dikkat çekmektedir [4,6]. ABD, İngiltere, Fransa gibi gelişmiş ülkelerde veri merkezleri çoğunlukla müstakil binalarda bulunurken, ülkemizde veri merkezi kapasitesinin yaklaşık %80'i ofis binalarının bir parçası olarak bulunmaktadır [7]. Bu nedenle önümüzdeki dönemde sektördeki büyümeye paralel olarak Türkiye'de büyük ölçekli müstakil veri merkezlerinde de artış beklenmektedir.

Veri merkezlerinde enerji verimliliği, veri merkezinin toplam güç kullanımının (P_D), bilişim teknolojilerinin (P_{IT}) güç kullanımına oranı ile elde edilen Güç Kullanım Etkenliği (Power Usage Effectiveness, PUE) ölçütü ile ifade edilmektedir [8].

$$PUE = P_D / P_{IT} \quad (1.1)$$

Mevcut eğilimler ışığında, ABD için 2020 yılında küçük ölçekli veri merkezlerinde PUE değerinin 2'ye, daha büyük ölçekli veri merkezlerinde 1,5'e, bulut ve internet devlerince oluşturulan hiper ölçekli veri merkezlerinde ise 1,2'nin altına ineceği ön görülmektedir [9]. Son tahminlere göre hiper ölçekli veri merkezlerinde artış öngörülse de, mevcut büyük, orta ve küçük ölçekli veri merkezleri kurulu kapasitenin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Bu veri merkezlerinde IT teçhizatının ortalama %50'si kadar enerji tüketebilen soğutma altyapısına yönelik enerji verimliliği uygulamalarıyla önemli tasarruflar sağlanabilir [9].

1.1 Tanımlar

Veri Merkezleri, her çeşit iş kolundan firmaların ihtiyaç duydukları, kullandıkları veya ürettikleri bilgileri; topladıkları, depoladıkları, işledikleri ya da dağıttıkları “merkezi” yerler için kullanılan büyük ölçekli bilgisayar odaları olarak adlandırılabilir. Genel olarak veri merkezleri barındırdıkları bilgilerin önem seviyesine göre değişkenlik gösterebilen bilişim teknolojileri alt yapısı, mekanik soğutma altyapısı, elektrik besleme altyapısı ve güvenlik sistemlerine haizdir. Genişletmek gerekirse veri merkezleri, güç kaynakları (ihtiyaca göre yedekli), bilişim teknolojileri teçhizatları (veri depolama ve iletişim sistemleri), soğutma (iklimlendirme) elemanları/sistemi (ihtiyaca göre yedekli), yangın algılama ve söndürme sistemleri (gazlı) ile erişim güvenlik sistemlerinden ihtivadır denilebilir.

Veri merkezlerinin yaygınlaşması ve şirketler tarafından kullanımının neredeyse zorunlu hale dönüşmesi “en güvenilir veri merkezinin nasıl belirleneceği” sorusunu gündeme getirmiş, devamında da sektörde belli standartların doğmasına vesile olmuştur. Bu standartların başında Uptime Enstitue tarafından yapılan değerlendirmeler sonucu verilen Tier Sertifikası gelmektedir. Buna göre 4 kısımdan oluşan sertifikasyon sınıfları Tier-1, Tier-2, Tier-3 ve Tier-4 olarak adlandırılmaktadır. Tarihsel olarak Tier-1 1960’larda, Tier-2 1970’lerde, Tier-3 1990’ların başında ve Tier-4 de 1994 yılında ortaya çıkmıştır [10]. Güvenilirlik ve hataya dayanıklılık bakımından en sıkı veri merkezleri Tier-4 sınıfında olup, genellikle kritik görevlerde kullanılan bilgisayarları barındırırlar. Çizelge 1.1 ile gösterildiği üzere Tier sınıflarının haiz olduğu güvenilirlik ve dayanıklılık; bilişim ekipmanları, soğutma sistemleri ve enerji alt yapısının tasarımına göre belirlenmektedir.

Çizelge 1.1 : Tier sınıfı özellikleri.

Bileşen	Tier-1	Tier-2	Tier-3	Tier-4
Jenaratör	-	N	N+1	2(N+1)
Kesintisiz Güç Kaynağı (UPS)	N	N+1	N+1	2(N+1)
Şebeke Enerji Beslemesi	1 aktif	1 aktif	1 aktif + 1 pasif	2 aktif
Soğutma/İklimlendirme Sistemi	N	N+1	N+1	2(N+1)
İhtiyaç Fazlası Bileşenler	N	N+1	N+1	2(N+1)
Yıllık Hata Süresi (saat)	28,8	22	1,6	0,4
Erişebilirlik	99,671%	99,741%	99,982%	99,995%
Çıkış Tarihi	1965	1970	1985	1995

1.2 Veri Merkezi Temel Soğutma Altyapısı

Büyük ölçekli bir veri merkezi için temel soğutma altyapısı bileşenleri su soğutma üniteleri (chiller), soğutma kuleleri, ısı değiştiriciler (eşanjör), hava ve su iletim sistemleridir.

1.2.1 Chiller

Isıyı bir kaynaktan başka bir kaynağa transfer etmek suretiyle soğutma sağlayan mekanik sistemlerdir. Genellikle ısının atıldığı ortama göre hava ve su soğutmalı olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Bünyesinde kompresör, kondenser, evaporatör ve genişleme vanasını ihtiva eder. Genel soğutma çevrimi mantığında olduğu gibi kompresörde sıkıştırılan ve ısıtılan akışkanın kondenserde soğutulması prensibine dayanarak soğutma sağlanır.

1.2.2 Soğutma kulesi

Soğutulan hacimlerden gelen suyun ihtiva ettiği ısıyı atmosfere uzaklaştırmak amacıyla kullanılan mekanik cihazlardır. Üzerinde bulunana fan ve su püskürtme uçları ile ısınmış suyun ısısı atmosfere bırakılırken, kullanışlı hale gelen su, soğutma suyu olarak sisteme geri gönderilir. Atmosfere açık mahallerde (genellikle binaların çatılarında ya da atıl bahçe zeminlerinde) konumlandırılırlar.

1.2.3 Pompalar

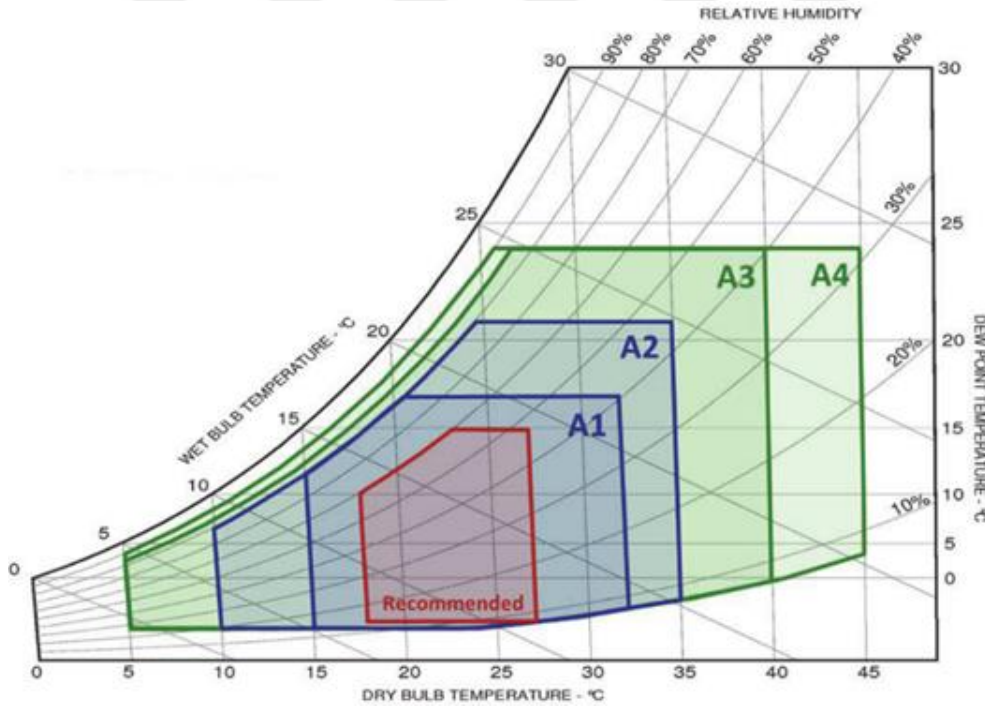
Pompalar suyun bir noktadan başka bir noktaya cebren iletimini sağlayan mekanik cihazlardır. Özellikle soğutma sistemlerinde, chillerden çıkan soğutulmuş suyun ve soğutma kulelerinden gelen soğutma suyunun gerekli noktalara gerekli debide iletilmesi görevini üstlenirler. Beyaz alan dışında genellikle mekanik hacimlerde boru hatları veya kollektörler üzerinde konumlandırılırlar.

1.2.4 CRAH

Sunucu odası hava soğutucusu (Computer Room Air Handler - CRAH) olarak adlandırılan, bünyesinde ısı değiştiricisi ve hava iletimini sağlayan fan ve filtre elemanlarını ihtiva eden mekanik cihazlardır. Isı değiştiricisi içerisinden geçirilen soğuk su ile ortamdan çekilen ısınmış havayı soğutup tekrar sunucuların bulunduğu ortama fan ve filtre elemanları yardımı ile ileten yapının bütünü CRAH olarak adlandırılır.

1.3 Ekonomizer Yöntemleri

Veri merkezlerinin en önemli bileşeni olan sunucuların sorunsuz çalışabilmeleri için belirli ortam şartları sağlanmalıdır. Bu bağlamda Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliğinin (ASHRAE) veri merkezlerinde bulunan elektronik cihazların kesintisiz çalışması için önerdiği ve kısa süreler için izin verdiği işletme şartları Şekil 1.1'deki psikrometrik diyagram üzerinde farklı çerçevelerle gösterilmiştir [11]. Buna göre tavsiye edilen çalışma çerçevesi için; maksimum sıcaklık 27 °C, minimum sıcaklık 18 °C, maksimum nem oranı %60 bağıl nem ve 15 °C çığ noktası sıcaklığı değeridir. Ayrıca elektrostatik boşalmaya karşı riskin minimum olduğu en düşük nem oranı için -9 °C çığ noktası sıcaklığı belirlenmiştir. Önerilen şartlar dışında uzun süre çalışmak, sunucularda arıza oranını artırırken sunucu arızalarının garanti kapsamı dışında kalmasına da neden olur [11].



Şekil 1.1 : Veri merkezlerinde kullanılan elektronik cihazlar için ASHRAE tarafından önerilen işletme şartları [11].

Tipik bir veri merkezinde sunucu kabinleri sıcak ve soğuk koridorlar oluşturacak şekilde yerleştirilirler [12]. Odadan çekilen sıcak hava soğutucu akışkan veya soğuk su geçirilen bir eşanjör vasıtası ile soğutulur ve yükseltilmiş zeminden fan yardımı ile üflenerek soğuk koridor ve sunucuların ön yüzeyine ulaştırılır.

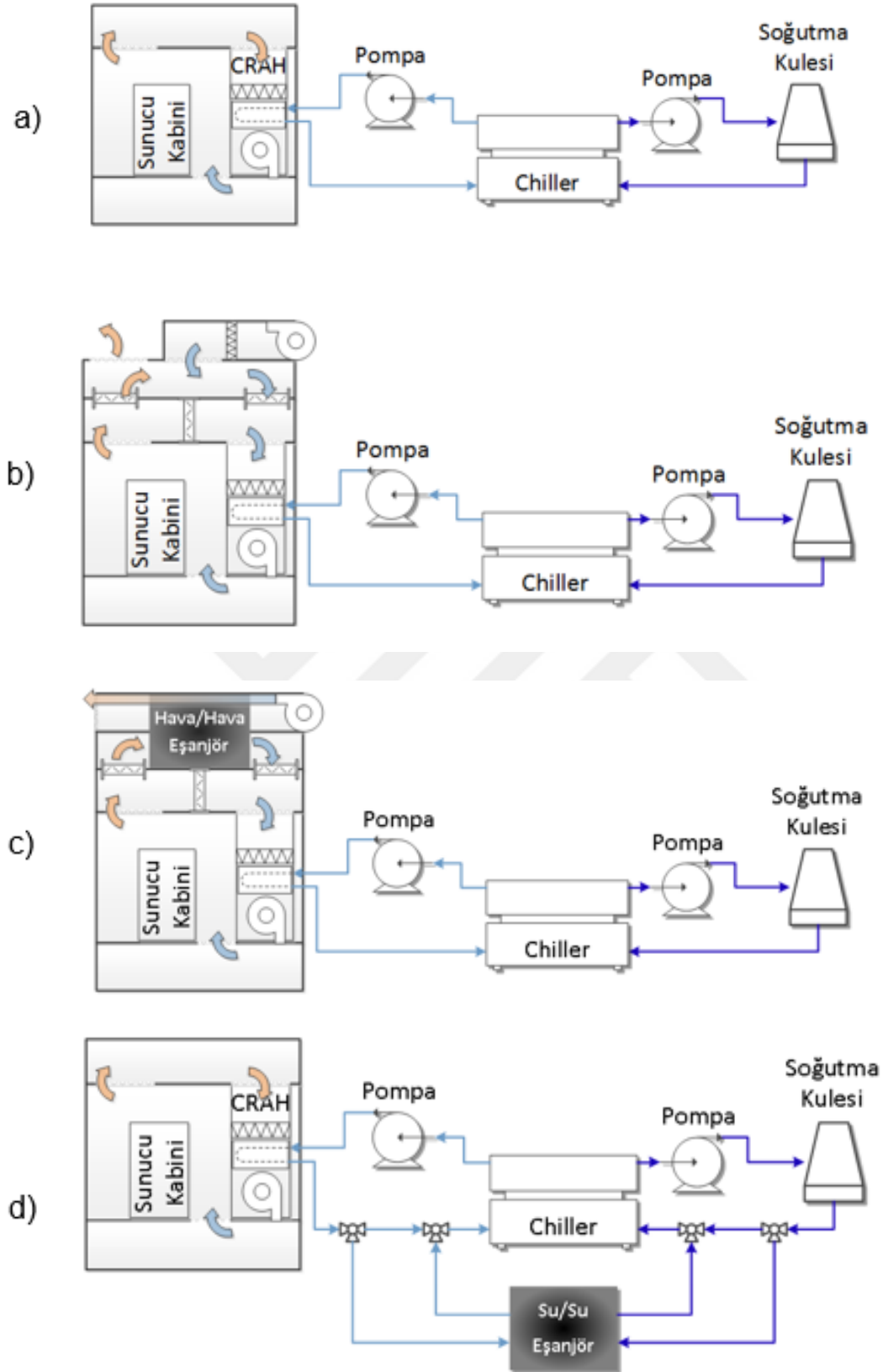
Veri merkezlerinde sıcak hava ile soğutulmuş havanın karışması sistem verimini olumsuz yönde etkileyen bir durum olup, veri merkezi işletme şartlarını belirlemektedir. Zira soğutma sistemi en yüksek giriş sıcaklığına sahip sunucuyu tavsiye edilenden yüksek sıcaklıklara maruz bırakmamak için diğer sunucuları gereğinden fazla soğutmak zorunda kalır. Daha düşük sıcaklıklarda çalışan soğutma sisteminin de verimi düşük olur. Veri merkezlerinin soğuk ve sıcak koridorlarının ayrılması, sunucu giriş sıcaklıklarının daha düzgün dağılım göstermesi için yaygın olarak kullanılan bir enerji tasarruf yöntemidir.

Geleneksel bir veri merkezinde soğutma altyapısı kabaca chiller grupları, soğutma kulesi, pompalar ve CRAH ünitelerinden oluşmaktadır (Şekil 1.2 a). Bu bileşenler ile sunucu adı verilen bilişim teknolojileri cihazları soğutulmaktadır.

Doğrudan hava (serbest soğutma yöntemi) ekonomizeri, atmosferik sıcaklık ve nem şartları uygun olduğu durumlarda dış ortamdaki havayı doğrudan veri merkezine yönlendirip, sunuculardan çıkan sıcak havayı da dışarı atarak çalışır (Şekil 1.2 b). Ancak kritik tesisler olarak kabul edilen veri merkezlerinde gerek hava gerekse su akımlarının doğrudan veri merkezine yönlendirilmesi kirlilik nedeniyle sakıncalar barındırmaktadır. Bu durumun doğuracağı riskleri minimize etmeye yönelik bir tedbir olarak ilave filtreleme yapılması tavsiye edilmektedir [13].

Enerji tasarrufu olarak dezavantajları olsa da dış ortam havasını bir ısı değiştiricisinden geçirerek ve dış ortam havasının şartlarından faydalananarak çalışan dolaylı hava serbest soğutma (ekonomizer) yöntemi veri merkezleri için daha güvenilir bir uygulama olarak kabul edilmektedir (Şekil 1.2 c). Benzer şekilde soğutma suyunu bir ısı değiştiricisinden geçirerek soğutulmuş su elde edilmesi prensibine göre çalışan dolaylı su serbest soğutma (ekonomizer) sistemleri de veri merkezleri için daha güvenilir serbest soğutma uygulamaları arasında gösterilmektedir (Şekil 1.2 d).

Bu “dolaylı” serbest soğutma sistemlerinin güvenilir olmasını sağlayan ısı değiştiricileri, ısı transferi bakımından verimsizlikleri beraberinde getirmektedir. Özellikle dolaylı su serbest soğutma (ekonomizer) yönteminde ısı transferi işlemi hava-su ortamları arasında gerçekleştirildiğinden, tasarruf bakımından diğer yöntemlere göre nispeten geri kalmaktadır.



Şekil 1.2 : Temel Bileşenler : (a)Geleneksel, (b)Doğrudan Hava, (c)Dolaylı Hava ve (d)Dolaylı Su Ekonomizeri.

1.3.1 Doğrudan hava ekonomizeri (ASE)

Genel itibari ile doğrudan hava ekonomizeri (ASE), dış ortam havasının uygun şartları sağladığı durumlarda direkt olarak soğutulmak istenen hacme (sunuculara) alınması prensibi ile çalışmaktadır. Bu sistemlerde dikkat edilmesi gereken iki temel husus vardır. Bunlar dış ortam havasında bulunan ve sunucular için tehlikeli olabilecek partiküllerin uygun şekilde filtre edilmesi ile yine havada bulunan nem miktarının veri merkezi ortamına etkisinin sürekli kontrol edilmesidir.

1.3.2 Dolaylı hava ekonomizeri (IASE)

Dolaylı hava ekonomizeri (IASE), ASE sistemine benzer şekilde dış ortam şartlarının uygun olduğu durumlarda bu avantajı kullanmayı amaç edinir. Temel fark adından da anlaşılacağı üzere dış ortam havasının direkt olarak soğutulmak istenen hacme alınması yerine hava-hava ısı değiştiricisi üzerinden duyulur ısı transferi sağlanarak (iç ortam dönüş havasının iyileştirilerek) sunuculara geri verilmesidir. Bu durum nispeten daha rahat filtreleme ihtiyacı oluşturması sebebiyle avantaj sağlar. Ancak ısı değiştiricilerinin yarattığı dirençlerin aşılması amacı ile nispeten daha güçlü fanların kullanımı gerekliliği oluşur. Özetle filtreleme bakımından avantaj sağlanırken fan güçleri bakımından bir dezavantaj söz konusudur.

1.3.3 Dolaylı hava ekonomizeri – evaporatif destekli (IEC)

Evaporatif destekli dolaylı hava ekonomizeri (IEC), IASE sistemi ile tamamen benzer mantıkla çalışmaktadır. Tek fark, kullanılan hava-hava ısı değiştiricisi üzerine su püskürten ilave pompa sistemini ihtiva etmesidir. Islak termometre sıcaklıkları ile çalışmak daha fazla tasarruf imkânı sağlarken, donma tehlikesi olan durumlarda su püskürtme sistemi kapatılarak IASE davranışı sergilenmesi de yine bir avantaj olarak IEC hanesine yazılmaktadır. Bu avantajların yanında IEC model için bakım ve işçilik maliyetleri bakımından diğer modellere nazaran handikap yaşanması muhtemeldir.

1.3.4 Dolaylı su ekonomizeri (WSE)

Dolaylı su ekonomizeri (WSE), geleneksel sisteme plakalı ısı değiştiricisi ve bu ısı değiştiricisinin oluşturacağı ilave akış direncini yenebilecek pompaların eklenmiş hali olarak düşünülebilir. Burada en temel avantaj sisteme entegrasyon kolaylığı ile ekleme işlemlerinin sunucu odalarından farklı mahallerde yapılıyor olmasıdır.

1.4 Literatür Taraması

Literatürde birden fazla serbest soğutma sistemini karşılaştıran çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı sıcaklık aralığı yöntemi gibi daha yüzeysel bir model yaklaşımını benimserken, bir kısmı tasarım dışı performans benzetimini de göz önünde bulunduran daha detaylı model yaklaşımları kullanmışlardır. Shehabi vd. [14] soğutma sisteminin kısmi yükünü göz önünde bulundurdıkları çalışmalarında ASE ve WSE sistemleri ile ilgilenmiş ancak çalışmayı sadece Kaliforniya'nın bazı şehirleri için yürütmüşlerdir. Ham vd. [15] modüler bir veri merkezinde ASE ve IASE'nin optimum çalışma şartlarını bulmayı amaçlasalar da, bu çalışmada da sadece Güney Kore'nin bazı şehirleri göz önünde bulundurulmuştur. Agrawal vd. [16] öncelikle WSE ve IEC gibi evaporatif destekli serbest soğutma yöntemlerini, Gözcü vd. [17] ise yukarıda da bahsi geçen 4 farklı serbest soğutma yöntemini dünyanın birçok farklı iklim bölgesi için değerlendirmişlerdir. Bulgular özellikle IEC'nin çok sıcak iklimlerde dahi hatırı sayılır derecede enerji tasarrufu sağladığını ortaya koymaktadır.

Literatürde veri merkezlerine yönelik çeşitli serbest soğutma yöntemlerini dünyanın farklı bölgeleri için değerlendiren çalışmalar bulunsa da, Türkiye şartları için benzer seviyede bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, Türkiye'nin on şehrinde çeşitli serbest soğutma (ekonomizer) yöntemlerinin, veri merkezlerinin enerji verimliliğine etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda geleneksel veri merkezinin yanında bahsi geçen dört ayrı sistem için değişken yük ve iklim koşullarına duyarlı termodinamik modellerden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1 Modelleme

Bu çalışmada Türkiye iklim şartlarındaki ekonomizer yöntemlerinin enerji tasarruf potansiyellerinin ortaya konması hedeflenirken, veri merkezi soğutma altyapısı bileşenlerinin modellenmesinde, değişken dış hava koşulları ve soğutma yükü durumlarında gösterilen “dinamik” performansların da ortaya konabilmesi amaçlanmıştır.

Bu bağlamda dış hava koşullarına ve soğutma alt yapısının karşılaması gereken değişken yüklere karşı davranışlarını irdelememizi sağlayacak dinamik bir modelleme altyapısı oluşturulmuştur.

2.1.1 Veri merkezi

Tüm ekonomizer sistemlerin bileşenlerinin modellenmesinden önce iyileştirme yapılacak veri merkezi özelliklerinin belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda veri merkezi bilişim teknolojileri (IT) altyapı yükünün 1000 kW, diğer elektriksel yüklerin (aydınlatma, UPS kayıpları vb.) 120 kW [18], veri merkezi duvarlarının adyabatik (ısı ve kütle girişi çıkışına kapalı) olduğu varsayılmıştır [19,20].

2.1.2 Chiller

Mekanik soğutma alt yapısının olmazsa olmaz ana unsuru olan chiller sisteminin kısmi yüklere karşı nispeten verimli çalışabilir olması adına, gerekli olan 1500 kW kapasitenin tek bir chiller yerine, her biri 500 kW kapasiteli ve paralel bağlı 3 adet su soğutmalı chiller ile karşılandığı varsayılmıştır.

Soğutma cihazlarının performans değerlerini gösteren ve “performans katsayısı” olarak adlandırılan bir ölçüt olan “COP” değeri, bu çalışmada kullanılan chillerler için hesaplamalarda 4,0 olarak kullanılmıştır. Chiller gruplarının tasarım-dışı çalışması, Braun ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş olan ve normalize edilmiş bir performans haritasına dayanarak en küçük kareler yöntemine göre elde edilen 3 adet değişkenin kullanımıyla elde edilmektedir [21].

Buna göre chiller elektrik gücünün (W_{ch}), chiller tasarım gücüne ($W_{ch,d}$) oranı (Z), kısmi yük oranı (X) ve kondenser ve evaporatör çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki sıcaklığın tasarım sıcaklık farkıyla normalize edilmiş haline (Y değerine) bağlı olarak yazılır.

$$\frac{W_{ch}}{W_{ch,d}} = Z = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3Y + a_4Y^2 + a_5XY \quad (2.1)$$

Kısmi yük oranı (X) ve kondenser ve evaporatör çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki sıcaklığın tasarım sıcaklık farkıyla normalize edilmiş haline (Y değerine) bağlı olarak yazılır. Daha önce Demetriou ve arkadaşları tarafından kullanılan ve performansı deneysel olarak sahada teyit edilmiş bir üniteye ait normalize edilmiş veri bu çalışmada da kullanılmaktadır [22].

2.1.3 CRAH

HVAC (ısıtma, havalandırma, iklimlendirme) sistemlerinde hava iletim aracı olarak fanlar kullanılmaktadır. Geleneksel veri merkezlerinde soğutma havasını iletmek amacıyla kullanılan fanlar CRAH adı verilen ünitelerin içinde konumlandırılır. Modelde sunucular için hava giriş-çıkış sıcaklık farkının $12,5^{\circ}\text{C}$ olmasının ve kaçaklar nedeniyle oluşacak kayıpların karşılanması adına sunucular için gerekli olan hava debisinin %25 artırılmasının yeterli olacağı kabulü yapılmıştır. CRAH içinde kullanılacak fanlar için hava akış debisinin $66,1 \text{ m}^3/\text{s}$ olacağı hesaplanmıştır.

CRAH içerisinde kullanılan fan gücü belirlenirken, piyasada makul kabul edilen fan ve motor verimi değerleri hesaba katılmıştır [23,24]. Yine CRAH içerisinde bulunan ve soğutulmuş su vasıtası ile sunuculara gönderilen havanın soğutulmasını sağlayan ısı değiştiriciler (HX) fanlar için direnç oluşturduğundan, fan gücü hesaplamalarında serpantin direnci de göz önünde bulundurulur. Modelde tercih edilen CRAH fan gücü için Erden ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [23] bahsedilen basınç düşüşünden faydalanarak $144,4 \text{ kW}$ CRAH fan gücü değeri elde edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen CRAH ısı değiştiricisinin termodinamik davranışı bypass (BP) metodu ile ortaya konmuştur. Buna göre CRAH içinden geçen havanın bir kısmı serpantini bypass edip herhangi bir sıcaklık değişimi yaşamazken, diğer kısım serpantinindeki ortalama su sıcaklığı ve doymuş şartlara erişip bypass olan havayla

karışarak çıkış şartlarını oluşturur. Hesaplamalarda ve modelde kullanılmak üzere ticari bir katalogdan faydalanılarak %17,5 BP oranı kabulü yapılmıştır [25].

2.1.4 Pompalar

HVAC sistemlerinde su iletim aracı olarak pompalar kullanılmaktadır. CRAH katalog verilerine dayanarak pompa su akış debileri, chiller ünitesi buharlaştırıcı (evaporatör) tarafında 6,6°C sıcaklık farkı oluşturacak şekilde belirlenmiştir. Yoğuşturucu (kondenser) tarafında ise sıcaklık farkı Taylor'ın çalışmasında chiller tesislerinde en düşük toplam maliyeti sağlayan 8,3°C olacak şekilde belirlenmiştir [26]. İlgili pompa gücü verileri için ASHRAE 90.1-2013 standardında birim akış için belirlenen değerler esas alınmıştır [27]. Her iki pompanın da sabit hızda çalıştığı ve sadece ASE, IASE ve IEC sistemlerinin bütün yükü karşıladığı durumlarda devreden çıktığı varsayılmaktadır.

2.1.5 Soğutma kulesi

Soğutma kulesi için ticari katalog verisi ve mevcut soğutma kapasitesi baz alınarak geleneksel sistem için bir ürün belirlenmiş, ilgili hava akış ve fan gücü verileri kullanılmıştır. Soğutma kulesi modelinin çalışması [28] kütle geçiş etkenliğiyle ilgili bağıntılar ve literatürde belli uygulamalar için sağlanan katsayılara [29] dayanmaktadır.

Seçilen ürün için belirlenen hava akışı bir kontrol sinyaliyle doğrusal olarak değiştirilebilmektedir. Kontrol sinyali ASHRAE 90.1-2013 standardında tavsiye edildiği gibi soğutma suyu sıcaklığını düşük dış ortam ıslak termometre sıcaklıklarında 21°C'nin üstünde ve yüksek sıcaklıklarda da kapasitesi ölçüsünde tasarım koşullarına yakın tutmaya çalışmaktadır [27]. Bunların arasındaki durumlarda yaklaşım sıcaklığı yine standartta belirtilen bir doğrusal bağıntıya göre kontrol edilmektedir. Böylelikle hem düşük sıcaklıklarda donma riski azaltılmış hem de soğutma kulesinin kapasitesi ölçüsünde dış ortam şartlarından istifade edilmesi sağlanmıştır.

Soğutma kulesince atmosfere ısı transferinin sağlanmasında en önemli rolü oynayan fan elemanının tükettiği güç, fana gönderilen kontrol sinyalinin (fan hızının) kübüyle orantılı şekilde değişmektedir.

2.1.6 ASE

ASE sistemi damper serisinin yanında filtre, nemlendirici ve ASE bileşenlerinin sebep olduğu basınç düşüşünü yenebilmek için konulan destek fanından oluşmaktadır. ASE modeli, gerekli dış hava miktarını, dönüş hava sıcaklığının yanında oda ve ASE için belirlenen ayar değerlerine göre belirlemektedir. ASE, sisteme nem ilavesinin önüne geçmek için 15°C çığ noktası sıcaklığının üstünde veya dış ortam yağ termometre sıcaklığının dönüş havası yağ termometre sıcaklığından yüksek olduğu durumlarda kapanmaktadır. ASE sistemlerinde dış hava doğrudan içeriye alındığından, sunucuların çevre hava kirliliğinden etkilenme riskini azaltmak adına daha sıkı filtreleme işlemi yapmak gereklidir. ASHRAE, özellikle ASE ile çalıştırılan veri merkezleri için MERV (Minimum efficiency reporting value) değerlendirme kıstaslarına göre minimum MERV 11 veya MERV 13 sınıfında filtreler kullanılmasını tavsiye etmektedir [30]. Bu çalışmada ASE sistemi için modelleme ve fan gücü belirleme hesaplamalarında MERV 11 filtre kullanımı kabulü yapılmıştır.

Nemlendirici kapasitesi özellikle soğuk iklimlerde görülen maksimum nemlendirme ihtiyacına göre belirlenmiştir. Bu değer için ASHRAE iklimlendirme sınıflarından en soğuk iklim sınıfındaki Jakutsk şehrinde ihtiyaç duyulan anlık pik nem miktarı olan 165 kg/saat kabul edilmiştir. Nemlendirici gücü için ticari bir katalog göz önünde bulundurularak 124kW değeri kabul edilmiştir [31].

Fan gücünün belirlenebilmesi adına öncelikle ASE ünitesi içerisinde bulunan bileşenlerin tek tek yaratacağı direnç (basınç düşüşü) değerleri ticari bir katalogdan [32] okunmuş ve ASE fanının yenmesi gereken toplam direnç (basınç düşüşü) değeri belirlenmiştir. Belirlenen basınç değeri ve ihtiyaç olunan debiyi sağlayacak fan hızına karşılık gelen verim değeri, ticari bir katalogdan [33] alınan fan eğrisi grafiklerinden %46 olarak okunmuştur. Okunan verim değeri ve akıştan hareketle fan gücü olarak 39 kW değeri hesaplanmış ve modellemede bu değer dikkate alınmıştır. Fan hava debi kapasitesi için iyileştirme sistemi olarak tasarım yapıldığından CRAH fan debisi ile aynı değer kabulü yapılmıştır.

Her bir ASE ünitesi bir CRAH ünitesiyle entegre edilecek şekilde ticari bir katalogdan [32] (Trane Unit Size-35) 17.500 ft³/min kapasiteli cihaz seçilmiştir. Buna göre seçilen klima santralinin 2,54m x 8,49m x 1,91m ölçülerinde olacağı tespit edilmiş olup, yüzey alanı olarak 85,13 m² karkas hesaplanmıştır.

2.1.7 IASE

IASE sistemi temel bileşeni iki akışın birbirine karışmasına izin vermeyen ve duyulur ısı geçişi sağlayan çapraz akışlı hava-hava ısı değiştiricisi ile dış ve iç ortam hava iletim hatları için kullanılan birer filtre ve fandan oluşmaktadır.

İç ve dış havanın kuru termometre sıcaklık değerleri hesaplanırken sabit bir ısıl etkenlik değeri ile aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$\varepsilon_{iase} = \frac{T_{r,db} - T_{s,db}}{T_{r,db} - T_{o,db}} \quad (2.2)$$

Etkenlik (0,69) ve ısı değiştiricisinin sebep olacağı basınç düşüşü değerleri için ticari bir katalog kullanılmıştır [32]. Dış ortam şartları veri merkezinin ihtiyacından da soğuk olduğu durumlarda CRAH havasının sadece bir kısmı IASE'ye yönlendirilmekte ve bu hava akışı bypass edilen havayla karıştığında istenen sıcaklığı elde etmek için ayar değerinden düşük bir sıcaklığa kadar soğutulmaktadır. Dış ortam şartlarına göre IASE'den geçmesi gereken akışı hesaplamak suretiyle kontrol sağlanmaktadır. IASE fanlarının enerji sarfiyatları yukarıda hesaplanan akış miktarına bağlı olarak modellenmiştir.

Fan gücünün belirlenebilmesi adına öncelikle IASE ünitesi içerisinde bulunan bileşenlerin tek tek yaratacağı direnç (basınç düşüşü) değerleri ticari bir katalogdan [32] okunmuş ve IASE fanlarının yenmesi gereken toplam direnç (basınç düşüşü) değeri belirlenmiştir. Belirlenen basınç değeri ve ihtiyaç olunan debiyi sağlayacak fan hızına karşılık gelen verim değeri, ticari bir katalogdan [33] alınan fan eğrisi grafiklerinden %58 olarak okunmuştur. Okunan verim değeri ve akıştan hareketle fan gücü olarak 55 kW değeri hesaplanmış ve modellemede bu değer dikkate alınmıştır.

Her bir IASE ünitesi bir CRAH ünitesiyle entegre edilecek şekilde ticari bir katalogdan [32] 17.500 ft³/min kapasiteli cihaz seçilmiştir. Buna göre seçilen klima santralinin 2,54m x 10,94m x 1,91m ölçülerinde olacağı tespit edilmiş olup, yüzey alanı olarak 106,97 m² karkas hesaplanmıştır.

IASE sisteminde dış havanın doğrudan içeriye alınması durumu olmadığından ASE ile işletilen veri merkezlerine göre daha rahat filtreleme imkânı sağlanabilmektedir. Nitekim ASHRAE, IASE ile işletilen veri merkezlerinde MERV 8 filtrelerin yeterli güvenilirlikte filtreleme sağlayacağını ortaya koymaktadır [30].

2.1.8 IEC

IEC sistem fiziksel tasarım olarak IASE sistem ile çok benzerdir. Her bir IEC ünitesinin karkas boyutlandırması, filtre kullanımı ve fan ihtiyacı IASE ile benzer şekilde yapılmıştır. Temelde tek değişiklik IASE’de kuru çalışan ısı değiştiricisinin yerine dış yüzeyine su püskürtülen bir ısı değiştiricisinin kullanılmasıdır. Bahsi geçen su püskürtme sistemi için, en sıcak/kuru iklimlerde tüketilmesi gereken maksimum anlık ihtiyaç olan 1 m³/h kapasiteli devirdaim pompasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yüzeyine su püskürtülen ısı değiştiricisi için iç ve dış havanın çıkış şartları ıslak termometre ısıl etkenliği bağıntısıyla hesaplanır.

$$\mathcal{E}_{iec} = \frac{T_{r,db} - T_{s,db}}{T_{r,db} - T_{o,wb}} \quad (2.3)$$

Bu bağıntı, oda dönüş havasının kuru termometre sıcaklığı $T_{r,db}$ ile dış havanın ıslak termometre sıcaklığının $T_{o,wb}$ bir fonksiyonudur. Temsili ıslak termometre etkenliği literatürde görülen tipik değerler baz alınarak 0,70 olarak kabul edilmiştir [34,35].

IEC sisteminin fanları ve filtreleri için yapılan kabullerin ve kullanılan değerlerin, IASE sistemi ile birebir aynı olduğu varsayımı ile hareket edilmiştir.

Çalışma prensibi olarak IEC sistem, dondurucu iklim şartlarında kuru çalışma imkânı sağlayıp, IASE gibi davranış göstermektedir.

2.1.9 WSE

WSE sistemi geleneksel sisteme ek olarak sabit ısıl etkenliğe sahip plakalı ısı değiştiricisinin termodinamik modelinden ve ekonomizer çevriminde kullanılan bu ısı değiştiricisinin neden olacağı direnci yenmek üzere tasarlanmış ilave pompalar sisteminden oluşmaktadır. Sistem çalışma prensibi kuleden gelen soğutma suyu gereğinden fazla soğuk olduğu durumlarda modelin bypass edilmesi gereken akış miktarını belirlemesine ve soğutulmuş su sıcaklığının ayar değerinin altına düşmemesini sağlamasına dayanmaktadır. Soğutma yükünü kısmen karşılayabileceği durumlarda, WSE ve chiller seri olarak çalışır, aksi halde devre dışı bırakılır.

Plakalı ısı değiştiricisinin ısıl etkenlik değeri benzer bir uygulamada kullanılan ısı değiştiricinin katalog verilerinden faydalanılarak 0,80 kabul edilmiştir [36].

WSE sistemi için gereken ilave pompaların özellikleri belirlenirken, ASHRAE 90.1-2013 standardına göre [27] birim akış başına gereken güç kriteri kullanılmış ve WSE sistemi devreye girdiğinde plakalı ısı değiştiricisinin sebep olduğu ilave basınç düşüşünü karşılayacağı varsayılmıştır.

WSE çalışması esnasında gerek duyulan soğutma kule çalışması WSE'ye özel olarak dış ortam ıslak termometre sıcaklığının bir fonksiyonu olarak belirlenmiş böylelikle soğutma kulesi ve WSE'den mümkün olduğunca fazla yararlanılmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda kule fanları WSE çalışması esnasında normale göre daha yüksek hızlarda ve daha düşük yaklaşım sıcaklıklarında çalışmaktadır.

2.1.10 İklim kategorileri (şehirler)

Modelleme ve simülasyon çalışmalarında kullanılmak üzere saatlik iklim bilgilerini içeren ve uluslararası bir veri tabanı olan Meteoronorm'dan faydalanılmıştır [37]. İklim sınıfları Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği (ASHRAE) tarafından yayınlanan 90.1-2013 standardında [38] çok sıcak iklimden çok soğuk iklime doğru gidildikçe 0 dan 8 e doğru artan rakamlarla simgelenmiştir. Nemli, kuru ve deniz iklimini A, B ve C harfleri temsil etmektedir. Türkiye için veri merkezi uygulamalarının daha yaygın olarak görülmesi beklenen büyük şehirler öncelikli olmak üzere farklı iklim çeşitliliğini kapsayacak 10 şehir belirlenmiş ve ilgili başlıca ortalama iklim verileri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Şehirler belirlenirken, nüfus yoğunluğu, iklim sınıfı çeşitliliğinin sağlanması ve bulundukları bölgelere göre gelişmişlik durumları gibi kıstaslar gözetilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 2.1 : 10 şehrin iklim sınıfları ve yıllık ortalama sıcaklık değerleri.

Kısaltma-Şehir	ASHRAE İklim Sınıfı	Kuru Termometre Sıcaklığı, °C	Islak Termometre Sıcaklığı, °C
ADA-Adana	Sıcak-Nemli / 2A	18,7	14,1
ANK-Ankara	Karışık-Nemli / 4A	10,5	6,1
ANT-Antalya	Sıcak-Nemli / 2A	19,1	13,8
BOL-Bolu	Karışık-Deniz İklimi / 4C	11,1	8,1
DIY-Diyarbakır	Karışık-Nemli / 3A	15,8	8,7
ERZ-Erzurum	Çok Soğuk / 7	5,0	1,3
IST-İstanbul	Ilık-Nemli / 3A	15,3	11,8
IZM-İzmir	Ilık-Nemli / 3A	17,0	11,8
KON-Konya	Karışık-Kuru / 4B	12,0	6,8
VAN-Van	Serin-Nemli /5A	9,7	5,8

2.2 Model Entegrasyonu

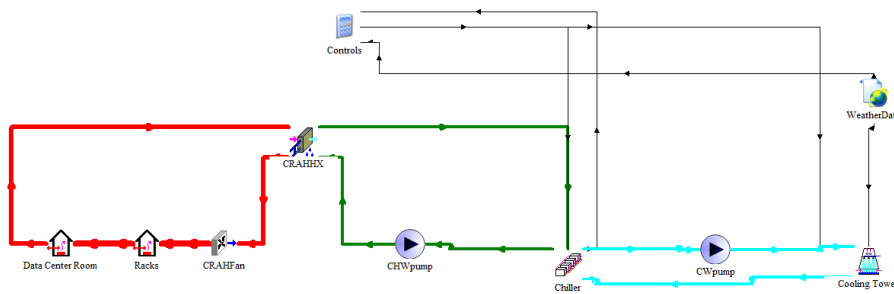
Bu kısımda çalışmada irdelenen serbest soğutma (ekonomizer) yöntemlerine ait modeller ile model bileşenleri arasında kurgulanan çalışma mantığı açıklanmıştır.

2.2.1 BL

Şekil 2.1’de Geleneksel (BL) veri merkezi çalışma mantığına uygun olarak herhangi bir kontrol olmaksızın chillerlerin sürekli açık olacağı şekilde kurgulanmış model bileşenleri gösterilmiştir. Kapalı koridor(H) işletme koşulları için 20°C, açık koridor(L) için 10°C soğutulmuş suyun CRAH ünitesine gönderilmesi ile veri merkezi soğutulması sağlanmaktadır.

BL veri merkezinde soğutma kulesi fan hızını kontrol eden sinyal yaş termometre sıcaklığının yüksek dereceden parçalı bir polinomudur.

Bu sinyal düşük yaş termometre sıcaklıklarında chiller kondenser suyu giriş sıcaklığının 21°C değerinin altına düşmesini engellemek, yüksek sıcaklıklarda ise doğrusal değişim gösteren yaklaşım sıcaklığını korumak üzere kurgulanmıştır [27].



Şekil 2.1 : Geleneksel (BL) model bileşenleri.

2.2.2 ASE

Şekil 2.2’de doğrudan hava ekonomizeri (ASE) için kurgulanmış model bileşenleri gösterilmiştir. Buna göre chilleri kontrol eden sinyalde seri bağlı 3 adet 500 kW kapasiteli (Ch_1 , Ch_2 , Ch_3) her bir chiller için, CRAH üfleme sıcaklığı ($T_{crah,x}$) ile CRAH üfleme ayar sıcaklığına ($T_{crah,set}$) göre açılma/kapanma sıcaklık sınır değerleri hesaplanmıştır. Söz konusu hesaplama yapılırken bir chiller kapasitesinin hava tarafında omuzlayabileceği sıcaklık farkı (ΔT_{ch}) ile chillerlerin verimli çalışacağı en düşük yükün hava tarafında oluşturacağı sıcaklık farkı ($\Delta T_{ch,min}$) değerleri; gerek açık(L) gerekse kapalı(H) koridorlu olmak üzere iki durum için de ayrı ayrı dikkate

alınmıştır. Soğutma grubu pompaları için de chillerlerin açık/kapalı olması durumuna göre sinyaller üretilmekte olup, chillerler kapalı iken pompalar da kapanmaktadır. Ekonomizeri kontrol eden sinyal için kurulan algoritma, model bileşeninin yapısı gereği dış hava ıslak termometre sıcaklık ($T_{wb,o}$) değerinin, beyaz alan ıslak termometre sıcaklık ($T_{wb,r}$) değerinden düşük veya eşit olması ile dış havanın 15°C çığ noktası sıcaklığının ($T_{dp,o}$) altında olması şartlarının aynı anda sağlanması durumunda ekonomizerin açılması şeklindedir. Aksi tüm durumlarda Ekonomizerin kapanması şeklinde sinyal üretilmesi kurgulanmıştır.

$$T_{crah,x} > T_{crah,set} + \Delta T_{ch,min} \rightarrow \text{Ch}_1 \text{ Açık.}$$

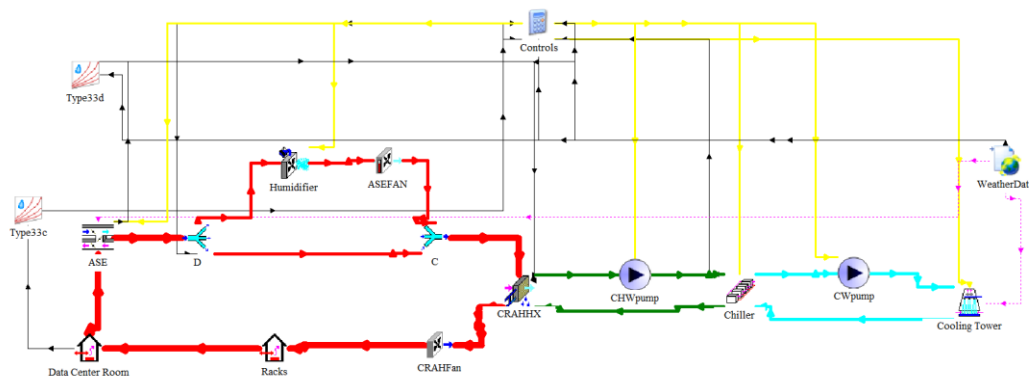
$$T_{crah,x} > T_{crah,set} + \Delta T_{ch} \rightarrow \text{Ch}_1 \text{ ve Ch}_2 \text{ Açık.}$$

$$T_{crah,x} > T_{crah,set} + 2 \times \Delta T_{ch} \rightarrow \text{Ch}_1, \text{Ch}_2, \text{Ch}_3 \text{ Açık.}$$

$$T_{wb,o} \leq T_{wb,r} \wedge T_{dp,o} < 15^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{ASE Açık.}$$

Hava ekonomizerli serbest soğutma sistemlerindeki soğutma kulelerinin fan hızları, anlık soğutma yükünün BL için varsayılan soğutma yüküne oranı nispetinde düşürülür. Bu doğrultuda belirlenen soğutma kulesi sinyali ile değişken hızlı fanlar için hem ihtiyaç kadar çalışma hızı sağlanması hem de aşırı soğuk havalarda don olayı yaşanma riskinin minimize edilmesi sağlanmıştır.

Nemlendirici, dış hava nem oranının izin verilen [11] değerlerin ($T_{dp,o} > -9^{\circ}\text{C}$) altında olduğu durumlarda devreye girmektedir.



Şekil 2.2 : Doğrudan hava ekonomizeri (ASE) model bileşenleri.

2.2.3 IASE

Şekil 2.3'te dolaylı hava ekonomizeri (IASE) için kurgulanmış model bileşenleri gösterilmiştir. Chilleri kontrol eden sinyal; seri bağlı 3 adet 500 kW kapasiteli (Ch₁, Ch₂, Ch₃) her bir chiller için, dış hava kuru termometre sıcaklığı (T_{db,o}), IASE modülünün tek başına tüm ısı yükü karşılayabildiği maksimum dış hava kuru termometre sıcaklığı (T_{iase,all}), bir chiller kapasitesinin omuzlayabileceği sıcaklık artışı (ΔT_{ch}), chillerlerin verimli çalışması için gereken minimum sıcaklık artışı (ΔT_{ch,min}) ile IASE fanlarının çalışmasının işletmeye getirdiği ekstra soğutma yükü kaynaklı sıcaklık farkına (ΔT_{iase}) bağlı olarak yapılan hesaplama ve simülasyon çalışmaları ile belirlenmiştir.

Tabii ki IASE çalıştırmak yapısındaki fanları gereği bedava değildir. Dış ortam havası (T_{db,o}), beyaz alan besleme havasından (T_{db,s}) IASE fanları kaynaklı ekstra soğutma yükünün getireceği sıcaklık farkı kadar (ΔT_{iase}) daha soğuk olmadıkça IASE çalıştırmak, işletmeye zarar ettirmektedir.

IASE modülüne hükmeden sinyal için, gerek açık(L) gerekse kapalı(H) koridorlu olmak üzere iki durum için de beyaz alanda nemlendirme ihtiyacının oluşmasını engelleme adına kademeli kıstaslar belirlenmiş ve sinyal içerisinde kurgulanmıştır. Buna göre gereğinden fazla soğuk dış ortam koşullarında dışarıdan alınan hava miktarının iç ortam dönüş havası ile ihtiyaç duyulan oranda karıştırılarak kullanılması sağlanmaktadır.

Soğutma gurubu pompaları için de chillerlerin açık/kapalı olması durumuna göre sinyaller üretilmekte olup, chillerler kapalı iken pompalar da kapanmaktadır. Soğutma kulesi çalışma mantığı ise ASE modeli ile birebir aynı kurgulanmıştır.

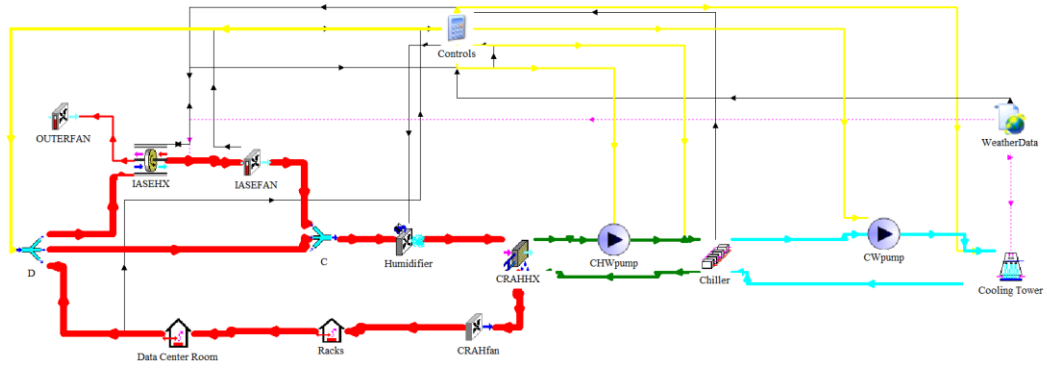
$$T_{db,o} < T_{iase,all} \rightarrow \text{Sadece IASE Açık.}$$

$$T_{db,o} > T_{iase,all} + \Delta T_{ch,min} \rightarrow \text{Ch}_1 \text{ Açık.}$$

$$T_{db,o} > T_{iase,all} + \Delta T_{ch} \rightarrow \text{Ch}_1 \text{ ve Ch}_2 \text{ Açık.}$$

$$T_{db,o} > T_{db,s} - \Delta T_{iase} \rightarrow \text{IASE kapalı; Ch}_1, \text{ Ch}_2, \text{ Ch}_3 \text{ Açık.}$$

IASE modülünün dış ortam havasının aşırı soğuk ve kuru olması durumunda beyaz alanda nemlendirme ihtiyacı oluşmasını engellemek adına da bir kıstas belirlenmiştir. Buna göre dış ortam havasının aşırı soğuk olduğu durumlarda iç ortam dönüş havası ile dış ortam havasının belli oranda karıştırılarak kullanılması sağlanmaktadır.



Şekil 2.3 : Dolaylı hava ekonomizeri (IASE) model bileşenleri.

2.2.4 IEC

Şekil 2.4’te evaporatif destekli – dolaylı hava ekonomizeri (IEC) için kurgulanmış model bileşenleri gösterilmiştir. Chilleri kontrol eden sinyal; seri bağlı 3 adet 500 kW kapasiteli (Ch₁, Ch₂, Ch₃) her bir chiller için, dış hava yaş termometre sıcaklığı ($T_{wb,o}$), IEC modülünün tek başına tüm ısı yükü karşılayabildiği maksimum dış hava yaş termometre sıcaklığı ($T_{iec,all}$), bir chiller kapasitesinin hava tarafında omuzlayabileceği sıcaklık farkı (ΔT_{ch}), chillerlerin verimli çalışacağı en düşük yükün hava tarafında oluşturacağı sıcaklık farkı ($\Delta T_{ch,min}$) ile IEC çalışmasının zarar ettirmeye başladığı dış hava yaş termometre sıcaklığına ($T_{iec,lim}$) bağlı olarak yapılan hesaplama ve simülasyon çalışmaları ile belirlenmiştir.

Tıpkı IASE modelde olduğu gibi IEC kullanımı da bedava olmayıp, dış ortam havası ($T_{db,o}$), beyaz alan besleme havasından ($T_{db,s}$) IEC fanları kaynaklı ekstra soğutma yükünün getireceği sıcaklık farkı kadar (ΔT_{iec}) daha soğuk olmadıkça IEC çalıştırmak, işletmeye zarar ettirmektedir.

$$T_{wb,o} < T_{iec,all} \rightarrow \text{Sadece IEC Açık.}$$

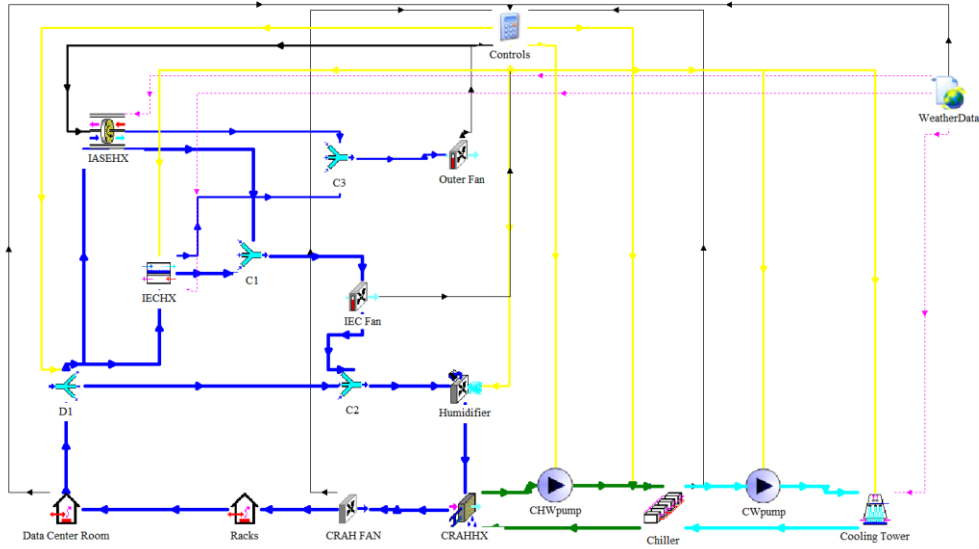
$$T_{wb,o} > T_{iec,all} + \Delta T_{ch,min} \rightarrow \text{Ch}_1 \text{ Açık.}$$

$$T_{wb,o} > T_{iec,all} + \Delta T_{ch} \rightarrow \text{Ch}_1 \text{ ve Ch}_2 \text{ Açık.}$$

$$T_{db,o} > T_{db,s} - \Delta T_{iec} \rightarrow \text{IEC kapalı; Ch}_1, \text{ Ch}_2, \text{ Ch}_3 \text{ Açık.}$$

Don riski olduğu durumlarda IEC modelinin kuru çalışma şartlarını temsil etmek için model içerisinde veri merkezinin dönüş havası IASE ısı değiştirici modeline yönlendirilmektedir. Soğutma gurubu pompaları için de chillerlerin açık/kapalı olması

durumuna göre sinyaller üretilmekte olup, chillerler kapalı iken pompalar da kapanmaktadır. Soğutma kulesi çalışma mantığı ise ASE model ile birebir aynı kurgulanmıştır.

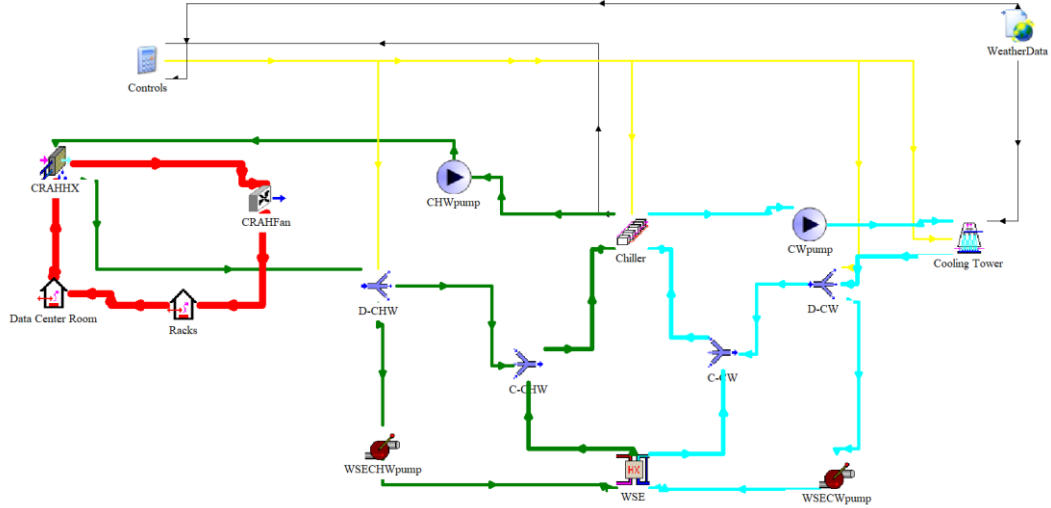


Şekil 2.4 : Dolaylı hava ekonomizeri – evaporatif destekli (IEC) model bileşenleri.

2.2.5 WSE

Şekil 2.5'te dolaylı su ekonomizeri (WSE) için kurgulanmış model bileşenleri gösterilmiştir. Chilleri kontrol eden sinyalde; seri bağlı 3 adet 500 kW kapasiteli her bir kompresör için, dış hava yaş termometre sıcaklığına göre açılma/kapanma sıcaklık sınır değerleri simülasyon ve alınan hata miktarına göre ayarlama yapılarak belirlenmiştir. Bu gözlem ve simülasyon çalışmaları açık(L) ve kapalı(H) koridorlu olmak üzere iki durum için de ayrı ayrı yapılmıştır. Söz konusu çalışmalar ışığında, H durumunda chiller açılma eşik değerleri sırası ile dış ortam ıslak termometre sıcaklığı ($T_{wb.o}$) 15°C - 18°C ve 21°C iken, L durumda 8°C - 8°C ve 10°C olarak belirlenmiştir. WSE modelinde soğutma grubu pompaları her durumda kullanıldığından söz konusu pompalar sürekli açık olacak şekilde kurgulanmıştır. Ekonomizeri kontrol eden sinyal, L durumda dış hava ıslak termometre sıcaklığının 10°C ve altında olduğu, H durumda ise 23°C ve altında olduğu sıcaklıklarda açma komutu verecek şekilde kurgulanmıştır. Soğutma kulesi fan hızını kontrol eden sinyal belirlenirken WSE HX bileşeninden çıkan soğutma suyu sıcaklığı H ve L durumları için ayrı ayrı gözlemlenmiştir.

Sinyal ifadesi, tüm soğutma ihtiyacının karşılandığı durumlar için yüksek dereceden polinomlarla, ekonomizerin yetmediği durumlarda kule tam kapasite çalışacak şekilde kurgulanmış ve sonuçlar buna göre elde edilmiştir.



Şekil 2.5 : Dolaylı su ekonomizeri (WSE) model bileşenleri.

2.3 Kabuller

Çizelge 2.2’de modelleme çalışmaları öncesi yapılan hesaplamalar ve kabuller sonucu elde edilen değerler ışığında belirlenmiş sistem bileşenlerinin özellikleri gösterilmiştir.

Buna göre BL durum için; 1000 kW bilişim sistemleri yükü ve 120 kW elektriksel (aydınlatma, UPS vb.) yük olduğu , CRAH cihazı ısı değiştiricisinin %17,5 bypass oranı ile çalıştığı, paralel bağlı 500 kW kapasiteli COP değeri 4 olan 3 adet chillerin kullanıldığı varsayımı yapılmıştır. Pompların tüketeceği elektriksel güç için debi ile ilişkilendirilmiş katsayılar kullanılarak hesaplamalar yapılmış olup, soğutulmuş su pompası için 15,6 kW, soğutma suyu pompası içinse 13,8 kW değeri elde edilmiştir. Söz konusu pompaların debilerinin tayininde evaporatör tarafında 6,6°K, kondenser tarafında 8,3°K sıcaklık farkının sağlanması koşulu ile hesaplamalar tamamlanmıştır. Benzer şekilde soğutma kulesi hesaplarında, kondenser (soğutma kulesi) tarafında 8,3°K sıcaklık farkını sağlayacak fan özellikleri için 18,6 kW motor gücü ve 40,7 m³/s hava debisi değerlerinin gerekliliği saptanmıştır.

CRAH cihazı fan debisi için, %25 oranında kaçak/sızıntı olacağı kabulü ile hesaplamalar yapılmış ve 87,9 m³/s debi sağlayacak fana ihtiyaç duyulacağı ortaya konmuştur.

Çizelge 2.2 : Sistem ve bileşenleri için kabul edilen ve hesaplanan değerler.

Model	Model Bileşeni	Varsayım ve Parametreler
BL	Veri Merkezi ve Kabinler (Type 88)	1000 kW IT yükü 120 kW Diğer yükler 66,1 m ³ /s Kabin Hava Debisi Adyabatik Duvarlar 87,9 m ³ /s Hava Debisi 114.4 kW Güç
	CRAH Fanı (Type 642)	17,5% Bypass Oranı
	CRAH Isı Eşanjörü (Type 508)	
	Su Soğutmalı Chiller (Type 53)	3x500 kW Soğutma Kapasitesi 4,0 COP
	Soğutulmuş Su Pompası (Type 114)	15,6 kW 44,6 kg/s Su Debisi
	Soğutma Suyu Pompası (Type 114)	13,8 kW 44,4 kg/s Su Debisi
	Soğutma Kulesi (Type 51)	18,6 kW Güç 40,7 m ³ /s Hava Debisi
ASE	Ekonomizer Fan (Type 744)	1x39 kW Güç 87,9 m ³ /s Hava Debisi
	Nemlendirici (Type 641)	165 kg/hr Nem Kapasitesi 124 kW Güç
IASE	Hava-Hava Isı Eşanjörü (Type 760)	0,69 Isıl Etkenlik
	Ekonomizer Fan (Type 744)	2x55 kW Güç 87,9 m ³ /s Hava Debisi
WSE	Plakalı Isı Eşanjörü (Type 699)	0,80 Isıl Etkenlik
	İlave Pompalar (Type 743)	3,6 kW Güç (Soğutma Suyu) 3,5 kW Güç (Soğutulmuş Su)
IEC	Hava-Hava Isı Eşanjörü (Type 757)	0,70 Yaş Termometre Etkenliği
	Ekonomizer Fan (Type 744)	2x55 kW Güç 87,9 m ³ /s Hava Debisi

2.4 Toplam Sahip Olma Analizi

Yatırımların, işletmenin gelecekteki başarısını, kârlılığını, verimliliğini, para akışını, risk derecesini belirleyecek en önemli faktörlerden biri olduğu göz önüne alındığında, bilinçli işletmelerde yatırımlar hakkında alınacak nihai kararlar en üst yönetim organı olan yönetim kurullarınca ve çeşitli finansal analiz yöntemleriyle elde edilen verilerin irdelenmesiyle alınır [39].

Yatırım hakkında nihai karar alınabilmesi için; ilk yatırım tutarı, yatırımın işletmeye sağlayacağı yararların ve büyüklüklerinin belirlenmesi, yatırımın işletmeye getireceği

ek maliyetler ve büyüklüklerinin belirlenmesi, yatırımdan beklenen verimin (getirinin) belirlenmesi ile ekonomik ömür, hurda değeri, indirgeme oranı, enflasyon oranı vb. verilerin bilinmesi gerekir [39]. Bir yatırımın tercih edilebilirlik durumunun ortaya konmasında kullanılan ekonomik analiz yöntemlerinden sık kullanılan ikisini Net Bugünkü Değer ve İç Kârlılık Oranı (İKO) Yöntemleri olarak kabul edebiliriz [39].

2.4.1 Toplam sahip olma (TSO) analizi yöntemleri

2.4.1.1 Net bugünkü değer yöntemi

Bir yatırımın net bugünkü değeri (NBD), yatırımın ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı para girişinin önceden saptanmış belirli bir indirgeme (iskonto) oranı üzerinden bugüne indirgenmiş değerleri toplamı ile yatırımın gerektirdiği para çıkışının bu belirli indirgeme oranı üzerinden bugünkü değeri toplamı arasındaki fark olup, matematiksel ifadesi denklem 2.4 ile verilmiştir. Buna göre bir yatırımın kabul edilebilir olması için NBD'in pozitif olması gerekmektedir.

$$NBD = \sum_{m=m+1}^t \frac{Fn}{(1+r)^n} - \sum_{n=0}^m \frac{Mn}{(1+r)^n} \quad (2.4)$$

Çeşitli yatırım projelerinden NBD pozitif olanlarının aralarında seçim yapılırken NBD en büyük olan projeler öncelikli olarak tercih edilmelidir.

NBD Yönteminde indirgeme oranı değerinin belirlenmesi hayati önem taşır. Bu oranın yüksek veya düşük saptanması yatırımlar arası sıralamayı etkilemekte ve yanlış tercihlere sebep olabilmektedir.

Yüksek indirgeme oranlarında ekonomik ömürlerinin ilk yıllarında daha fazla para girişi yaratan projeler öncelik aldığı halde, düşük indirgeme oranlarında para girişlerinin zaman içindeki dağılımının önemi azalmakta, para girişinin salt tutarı ağırlık kazanmaya başlamaktadır [39].

İndirgeme oranı belirlenirken aşağıdaki kıstaslar göz önünde tutulabilir:

- Yatırımın taşıdığı risk
- Yatırımdan beklenen en düşük kâr oranı
- Benzer yatırımlardaki kârlılık oranı
- İlk yatırım maliyeti

NBD yönteminde asgari iç kârlılık oranı, ölçülü, ihtiyatlı bir oran olarak nitelendirilebilir ve bu oranın tüm projelerde uygulanabilir olma gibi bir üstünlüğü bulunmaktadır [39]. NBD yöntemi bir projenin işletme değerine yaptığı katkıyı irdeler. Bu bakımdan NBD yükseldikçe işletmenin değeri artar ve bu durum işletmeleri genellikle NBD yöntemini kullanmaya itmektedir.

NBD yöntemi, onca üstün yönünün yanında aşağıda sıralanan noktalardan eleştirilmektedir [39]:

- Bu yöntemde yatırımlar arasında yapılacak seçimde dışarıdan objektifliği tartışmalı ve sonuçlarda belirleyici rol üstelenen bir öge (indirgeme oranı) katılmaktadır.
- İndirgeme oranının yatırımın ekonomik ömrü boyunca sabit kaldığı kabul edilmektedir.
- NBD yönteminde İKO hesaplanmamakta, sadece asgari kârlılık oranına göre büyüklüğü irdelenmektedir.

2.4.1.2 İç kârlılık (verim) oranı yöntemi

Yatırımın iç kârlılık oranı (İKO), yatırımın gerektireceği para çıkışı ile ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı para girişini eşit kılan indirgeme (iskonto) oranı olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle yatırımın “net bugünkü değerini” sıfıra eşitleyen indirgeme oranına iç kârlılık oranı adı verilmektedir. İç kârlılık oranı, r , denklem 2.5 ile hesaplanabilir.

$$\sum_{n=m+1}^t \frac{Fn}{(1+r)^n} = \sum_{n=0}^m \frac{Mn}{(1+r)^n} \quad (2.5)$$

Burada, F_n , n . yıldaki fayda, M_n , n . yıldaki yatırım, m , yatırımın tamamlanma süresi, r , iç kârlılık oranı, $t-m$ ise yatırımın ekonomik ömrünü temsil etmektedir.

İç kârlılık oranı yöntemi zaman faktörü ve yatırımın ekonomik ömrünü dikkate alıp, para giriş ve çıkışlarını aynı zaman düzeyine indirmek suretiyle mukayese edilebilir hale getiren objektif bir yöntem olmasının yanında, aşağıda sıralanan noktalar bakımından eleştiriler almaktadır [39]:

- Bazı yatırım projelerinde tek bir İKO hesaplamak olanaksızdır.
- Biri gerçekleştirildiğinde diğerinden vazgeçilmesi gereken yatırımlar arasında seçim yapılırken hatalı tercihlere yol açabilmektedir.
- Gelişmekte olan ülkeler için bazı hallerde İKO yüksek proje yerine ekonomik ömrü daha uzun projelere öncelik vermek, işletme kârlılığı açısından daha doğru bir karar olabilmektedir.

Buradan hareketle İKO, yeniden yatırım hesaplamalarında sürekli artan bir oran kullanmak suretiyle yanıltıcı sonuçlar alınmasına sebep olabilmektedir. Bunun yerine, yeniden yatırım hesaplamalarında sabit bir oran olan değiştirilmiş İKO (DİKO) kullanılarak daha sağlıklı sonuçlar elde edilmektedir [40].

2.4.1.3 İndirgenmiş geri ödeme süresi yöntemi

Yatırımın karlılık ve uygulanabilirlik durumunun belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden birisi de indirgenmiş geri ödeme süresi yöntemidir. Bu yöntemle hesaplanan süre, indirgenmiş nakit akış toplamının negatiften pozitive döndüğü zaman dilimini nitelemektedir [41]. Başka bir deyişle yatırımın kendini amorti etmesi için geçen süre olarak adlandırılabilir. Hesaplamalarda paranın zaman değeri ve nakit akışları dikkate alınmaktadır.

2.4.2 İlk yatırım maliyetleri

Serbest Soğutma (ekonomizer) modellerinde kullanılan sistemler ve bileşenleri ile bunlara karşılık gelen ilk yatırım maliyetleri belirlenirken, genellikle proje bazlı teklif hazırlayan ticari firmalardan teklif almak yerine daha tutarlı bir fiyat tespiti sağlayacak olan Çevre ve Şehircilik Bakanlığınca (ÇŞB) hazırlanmış “İnşaat ve Tesisat Analiz ve Birim Fiyatları - 2017” kitabından faydalanılmıştır [42]. Buna göre modellenen sistemlerde kullanılan bileşenlerle örtüşen pozlar belirlenmiş, bu pozlara karşılık gelen birim fiyatlar ile her bir bileşen için maliyet belirleme çalışmaları tamamlanmıştır.

Bileşenlerin maliyetleri belirlenirken ilgili bileşenin alan, debi, basınç, kapasite vb. farklı farklı özelliklerine ihtiyaç duyulmuş olup, yukarıda bahsedilen maliyet belirleme yöntemine göre serbest soğutma (ekonomizer) yöntemleri için hesaplanmış toplam ilk yatırım maliyetleri Çizelge 2.3’te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3 : İlk yatırım maliyetleri çizelgesi (TL).

Bileşen Adı (Piyasa)	Bileşen Adı (ÇŞB)	ASE	IASE	IEC	WSE
Santral Karkası	Klima Santrali Hücresi	253.760	318.886	318.886	-
Fanlar	Radyal Aspiratör	48.400	96.800	96.800	-
Filtreler	Kuru Hava Filtreleri	63.254	46.553	46.553	-
Nemlendirici	Nemlendirici	76.340	-	-	-
Su-Su Isı Değiştirici	Plakalı Isı Değiştirici	-	-	-	25.440
Hava-Hava Isı Değiştirici	Klima Santrali Isı Geri Kazanım Cihazı	-	452.870	452.870	-
Pompalar	Santrifüj Pompa	-	-	-	6.040
Evaporatif Soğutucu	Sirkülasyon Pompası	-	-	483	-
Hava Kanalı	Hava Kanalı	1.604	1.604	1.604	-
Toplam (TL)		443.359	916.712	917.195	31.480

2.4.3 Bakım maliyetleri

Bakım operasyonları, işletme devamlılığı, verimliliği ve sistem kullanım ömrüne pozitif etkisi gereği bir işletmenin olmazsa olmazıdır. Üstelik veri merkezleri gibi kritik öneme sahip işletmeler göz önüne alındığında 7/24 izleme ve denetleme kaçınılmaz bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.

Standart veri merkezi soğutma alt yapısına eklenen serbest soğutma (ekonomizer) modellerinin elemanları için piyasadan alınan teklifler ışığında oluşturulmuş ve her 4 ayda bir yapılacak ilave bakım işlemleri aşağıda sıralanmıştır:

- Aspiratör/Vantilatör kayış kontrolü, gerekiyorsa değişimi
- Fan yataklarının kontrolü
- Motor akımlarının ölçüm yapılarak kontrolü
- Hava filtrelerinin kontrol ve temizliği, gerekiyorsa değiştirilmesi
- Soğutucu/ısıtıcı bataryaların kontrolü/temizliği
- Yoğuşma tavaları ve drenaj hatlarının kontrolü/temizliği
- Damperlerin kontrolü
- Elektrik bağlantılarının kontrolü
- Isı değiştirici temizliği ve kontrol sisteminin kontrolü

Bu detaylar ışığında ticari firmalardan alınan bakım tekliflerine [43,44] göre belirlenen yıllık bakım maliyet giderleri Çizelge 2.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 : Yıllık bakım giderleri çizelgesi (TL).

Bakım Giderleri	ASE	IASE	IEC	WSE
	7.280	7.580	11.195	2.000

2.4.4 Enerji maliyetleri

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Enerji Piyasası Düzenleme Kurumundan (EPDK) aldığı iletim lisansı çerçevesinde, elektrik iletim altyapılarını genişletmek, yeni iletim tesisleri yapmak, elektrik piyasası hizmetlerini yürütmekten sorumludur [45].

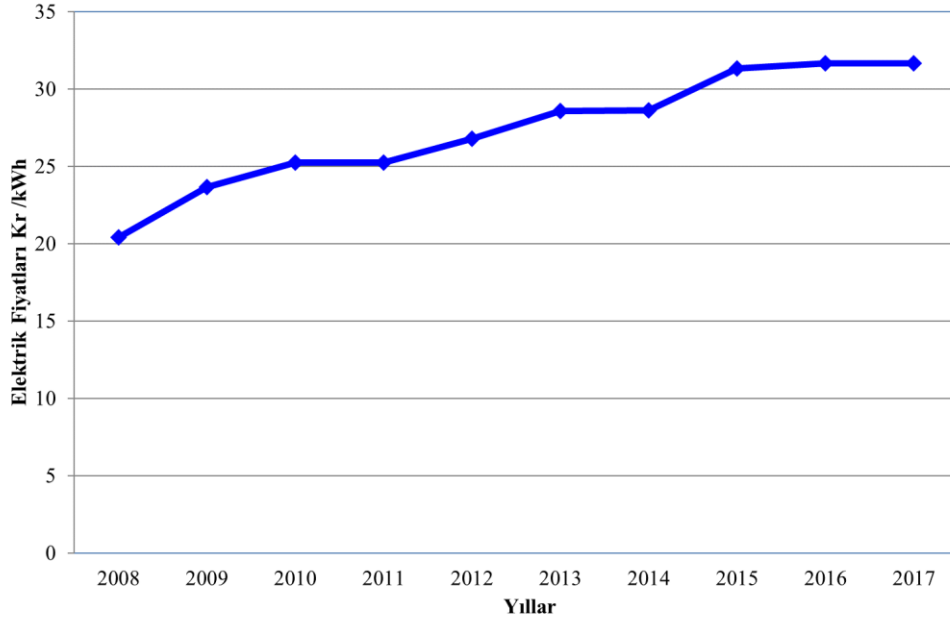
Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (TEDAŞ), toptan aldığı elektriği Türkiye genelinde belirlediği 21 bölge müdürlüğü aracılığı ile EPDK’nın belirlediği fiyatlarla son kullanıcılara perakende olarak satar [46]. Son kullanıcılar, tüketecekleri elektriği ya TEDAŞ’ın bölge müdürlüklerinden (tüm Türkiye’de sabit ve tek birim fiyat) ya da elektrik üretilen özel şirketlerden yapılacak pazarlığa göre özel şartlarla/birim fiyatlarla alabilirler [47].

Aralık 2017 için, bölge farkı olmaksızın TEDAŞ’tan alınacak “ticarethane tüketici grubu – tek terimli – tek zamanlı” orta gerilim (OG) elektrik birim fiyatı 31,6584 Kır/kWh olarak Şekil 2.6’dan okunmaktadır [48].

Dağıtım Sistemi Kullanıcıları	Perakende Tek Zamanlı Enerji Bedeli	Perakende Gündüz Enerji Bedeli	Perakende Puant Enerji Bedeli	Perakende Gece Enerji Bedeli	Dağıtım Bedeli	Tek Zamanlı	Gündüz	Puant	Gece
Orta Gerilim						Orta Gerilim			
Çift Terimli						Çift Terimli			
Sanayi	20.5219	20.3887	36.3022	8.9104	4.9635	25.4854	25.3522	41.2657	13.8739
Ticarethane	22.1207	21.9821	38.9159	9.7482	7.6076	29.7283	29.5897	46.5235	17.3558
Mesken	22.1020	21.9634	38.8971	9.7299	7.4240	29.5260	29.3874	46.3211	17.1539
Tarımsal Sulama	20.1340	20.0074	35.4751	8.8338	6.2398	26.3738	26.2472	41.7149	15.0736
Aydınlatma	20.2431				7.3067	27.5498			
Tek Terimli						Tek Terimli			
Sanayi	20.5219	20.3887	36.3022	8.9104	5.4954	26.0173	25.8841	41.7976	14.4058
Ticarethane	22.1207	21.9821	38.9159	9.7482	9.5377	31.6584	31.5198	48.4536	19.2859
Mesken	22.1020	21.9634	38.8970	9.7299	9.3075	31.4095	31.2709	48.2045	19.0374
Tarımsal Sulama	20.1341	20.0075	35.4752	8.8339	7.8227	27.9568	27.8302	43.2979	16.6566
Aydınlatma	20.4150				8.9884	29.4034			
Alçak Gerilim						Alçak Gerilim			
Tek Terimli						Tek Terimli			
Sanayi	20.5219	20.3887	36.3022	8.9104	8.5478	29.0697	28.9365	44.8500	17.4582
Ticarethane	22.1208	21.9822	38.9161	9.7483	11.3552	33.4760	33.3374	50.2713	21.1035
Mesken	22.1020	21.9634	38.8971	9.7299	11.0813	33.1833	33.0447	49.9784	20.8112
Şehit Aileleri ve Muharip Malul Gaziler	7.7000				8.2521	15.9521			
Tarımsal Sulama	20.1340	20.0074	35.4751	8.8338	9.3137	29.4477	29.3211	44.7888	18.1475
Aydınlatma	20.5770				10.5721	31.1491			
Genel Aydınlatma	15.1522				10.5721	25.7243			

Şekil 2.6 : Elektrik birim fiyat çizelgesi [48].

TSO analizi hesaplamalarında tüketilen elektrik maliyetlerinin belirlenebilmesi amacıyla 2008-2016 arası bahsi geçen tarife için fiyat değişimi Şekil 2.7 ile ortaya konulmuştur [48]. Bu değişim miktarı göz önüne alındığında elektrik birim fiyatının yıllık artış oranı olarak %6,1 oranı elde edilir.



Şekil 2.7 : Yıllara göre elektrik birim fiyat değişimi (Kr / kWh).

2.4.5 Su maliyetleri

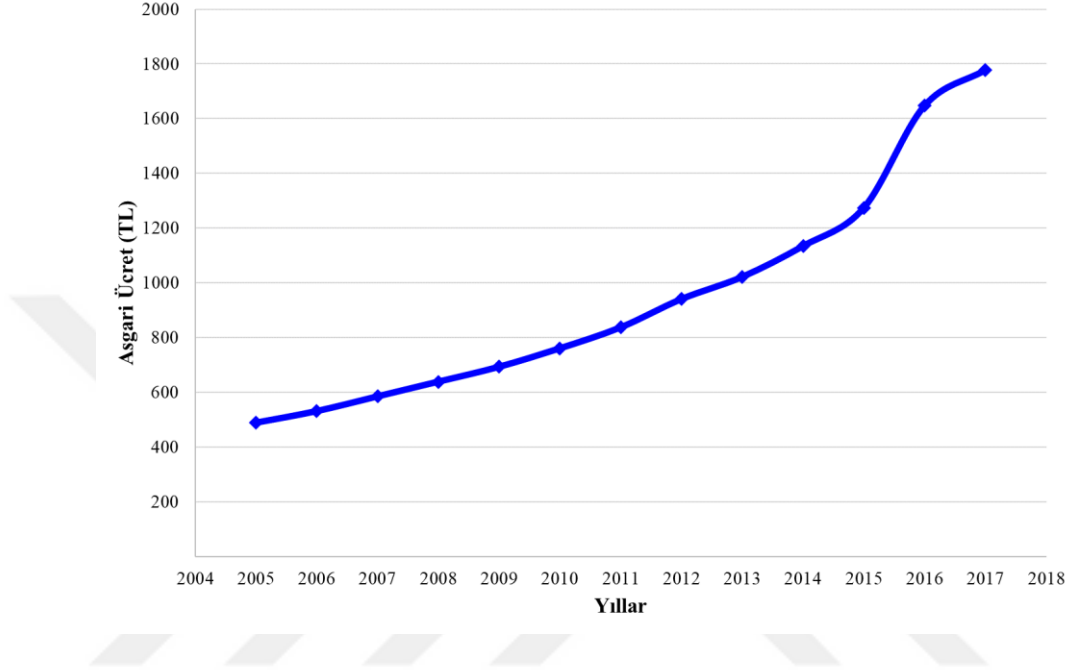
Türkiye’de son kullanıcılara şebeke suyu ulaştırılması görevi 03.07.1968 tarih ve 1053 sayılı “belediye teşkilâtı olan yerleşim yerlerine içme, kullanma ve endüstri suyu temini hakkında kanun” ile belediyeler uhdesinde yürütülmektedir [49]. Belediyeler bu suyu barajlardan, kuyulardan, kaynaklardan, akarsulardan, göl-gölet-deniz vb. kaynaklardan sağlamaktadırlar. TSO analizi hesaplamalarında tüketilen suyun maliyetlerinin belirlenebilmesi amacıyla Aralık 2016 için Türkiye’de 10 şehre ait şebeke suyu birim m³ fiyatları, ilgili belediyeler veya bölgede faaliyet gösteren işletmelerden derlenerek Çizelge 2.5’te verilmiştir [50-58].

Çizelge 2.5 : İllere göre Aralık 2016 dönemi şebeke suyu birim fiyatları (TL/m³).

ADANA [50]	ANKARA [51]	ANTALYA [52]	BOLU [53]	DİYARBAKIR [54]	ERZURUM [55]	İSTANBUL [56]	İZMİR [57]	KONYA [58]	VAN [53]
7,44	13,70	3,85	8,80	6,45	5,34	10,01	8,28	7,20	3,60

2.4.6 İşçilik maliyetleri

Türkiye için 2005 – 2017 dönemi işçilik ücretlerindeki (asgari ücret) artış Şekil 2.8’de gösterilen değişime göre yıllık ortalama %11,5 olarak gerçekleşmiştir [59]. Bu oran TSO analizi hesaplamalarında bakım maliyetlerinin yıllara sarıh olarak ne oranda değişeceği hakkında fikir vermekte ve hesaplamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.8 : Yıllara göre asgari ücret değişimi (TL).

2.4.7 Oranlar

2.4.7.1 İndirgeme (iskonto) oranı

İndirgeme oranı projenin kabulü için yatırımdan beklenen asgari iç kârlılık oranıdır. Bu değer paranın zaman değerinin yanında yatırımcıyı ilgilendiren diğer risk faktörlerini de göz önünde bulundurabilir. Başka bir deyişle indirim oranı düştükçe uzun vadeli yatırımlar tercih edilebilir olmaktadır. Spangler ve Jeffers (2010), hava ve su taraflı serbest soğutma yöntemlerinin 15 yıllık TSO analizinde %8’lik bir indirim oranı kullanmışlardır [60]. Veri merkezlerinde kullanılan filtrelerin enerji tüketimi ve hava kalitesine etkisinin incelendiği bir başka çalışmada 20 yıllık TSO analizi için yine %8’lik indirim oranı varsayımı yapılmıştır [61].

Benzer şekilde bu çalışmada da indirim oranı olarak %8 oranı makul ve kullanılabilir varsayılmıştır. Bunun yanında DİKO hesaplamalarında kullanılmak üzere finans ve yeniden yatırım oranları da %8 olarak kabul edilmiştir.

2.4.7.2 Enflasyon oranı

Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre 2004 – 2016 yılları arasında oluşan enflasyon değerleri Çizelge 2.6’da gösterilmiştir [62]. Bu veriler ışığında ortalama enflasyon değeri olarak %8,3 rakamı ortaya çıkmaktadır. Bu rakam, TSO maliyet analizi hesaplamalarında özellikle bakım aşamasında değişimi gerekecek bileşenlerin (filtreler vb.) yıllara sarıh birim ürün maliyetinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Çizelge 2.6 : 2004-2016 yılları arasında gerçekleşen yıllık enflasyon oranları (%).

Yıl	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enflasyon Oranı	9,35	7,72	9,65	8,39	10,06	6,53	6,40	10,45	6,16	7,40	8,17	8,81	8,53

2.4.8 Ekonomik ömür

Spangler ve Jeffers (2010) ekonomizer çevrimlerinin veri merkezlerinde sağladığı enerji tasarruf miktarlarını ortaya koyarken, TSO maliyeti çalışmalarını da 15 yıl için yapmıştır [60].

Bunun yanında Çizelge 2.7’de de gösterildiği üzere, veri merkezi ekonomizer (serbest soğutma) altyapı bileşenlerinin ekonomik ve verimli çalışma ömürlerinin en az 15 yıl ve üzerinde [63] olmasından hareketle, TSO maliyeti analizleri yapılırken baz alınan 15 yıllık süre makul ve kabul edilebilir olarak tasavvur edilmiştir.

Çizelge 2.7 : Serbest soğutma sistemi bileşenleri ve ekonomik ömürleri.

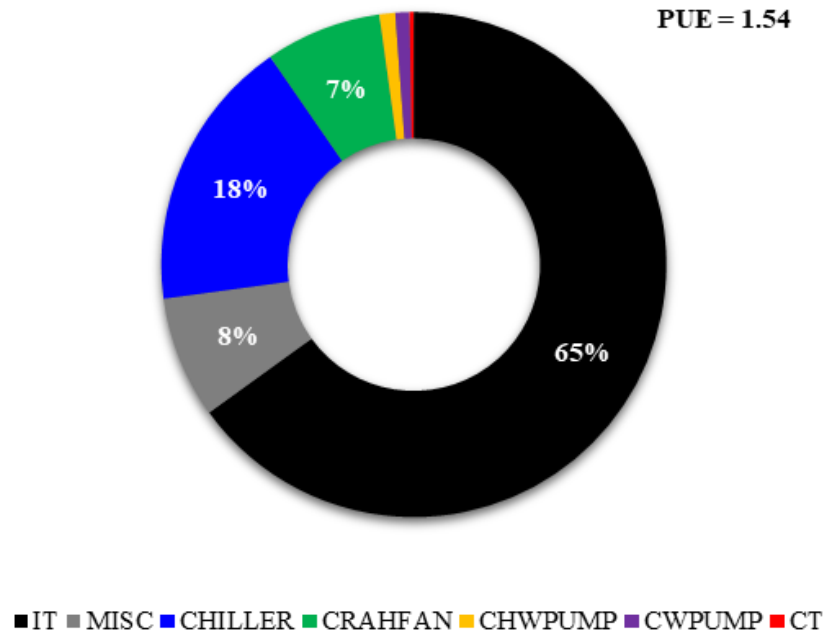
Bileşenler	Ekonomik Ömür (yıl)
Fanlar	17
Filtreler	0,5
Hava-Hava Isı Değiştirici	30
Nemlendirici	15
Su-Su Isı Değiştirici	25
Pompalar	19

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Enerji Tüketimi

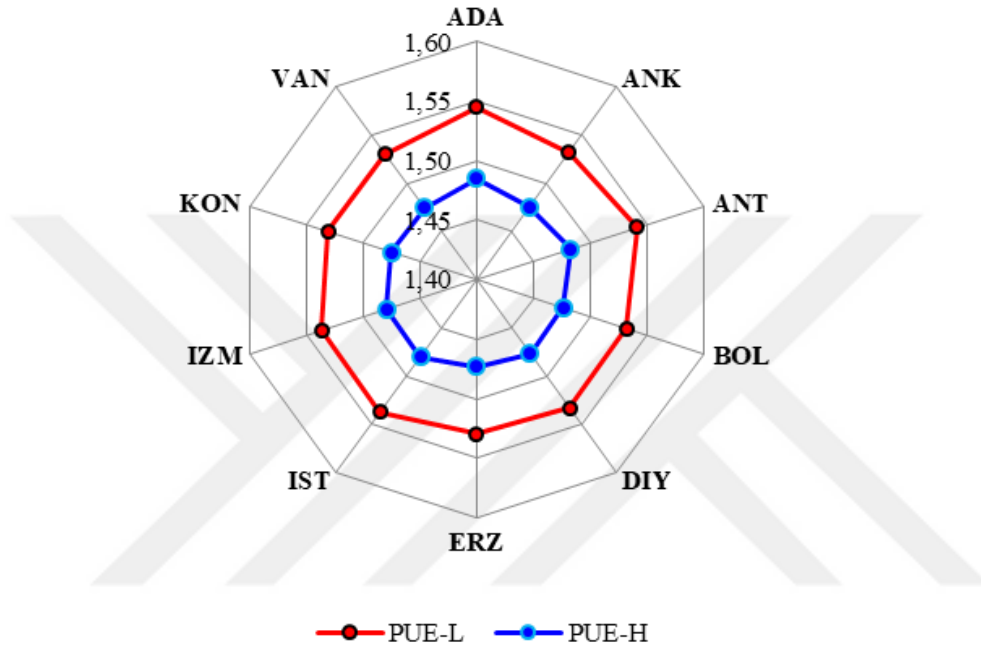
Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Türkiye’de belirlenen 10 şehir için 5 ayrı modelde gerçekleştirilen ve ticari bir yazılım olan TRNSYS [64] ile kurgulanan yıllık enerji simülasyonlarına dayanmaktadır. Şekil 3.1 İstanbul için 10°C soğutulmuş su ile çalışan geleneksel (BL) açık koridorlu (L) veri merkezi yıllık enerji kullanımı dağılımını vermektedir. IT ile sunucuların, MISC ile elektriksel kayıplar ve aydınlatmanın, CHILLER ile chiller kompresörünün, CRAHFAN ile CRAH ünitesinin içinde yer alan fan motorunun, CHWPUMP ve CWPUMP ile sırasıyla soğutulmuş su ve kule soğutma suyuna ait pompaların, CT ile soğutma kulesi fan motorunun enerji tüketimi gösterilmiştir.

Bu başlangıç modeli için elde edilen *PUE* değeri (1,54), son raporlarda verilen üst düzey veri merkezlerinin mevcut eğilimlere göre 2020’de ulaşacağı verimle [9] karşılaştırıldığında makul ve ihtiyatlı kabul edilebilir.



Şekil 3.1 : BL-L veri merkezinin İstanbul için yıllık enerji sarfıyatı dağılımı.

PUE değerleri hem şehirden şehire hem de düşük veya yüksek sıcaklıkta çalışma durumuna göre farklılık göstermektedir. Şekil 3.2, Geleneksel (BL) veri merkezi *PUE* değerinin, Türkiye'nin 10 şehri için yüksek (H) ve düşük (L) çalışma sıcaklıklarındaki değişimini göstermektedir. Belirli bir sıcaklık aralığında tutulan soğutma suyuyla soğutulan chiller kullanımı ile bölgesel farklılıkların sonuca etkisinin daha az olması sağlamıştır.



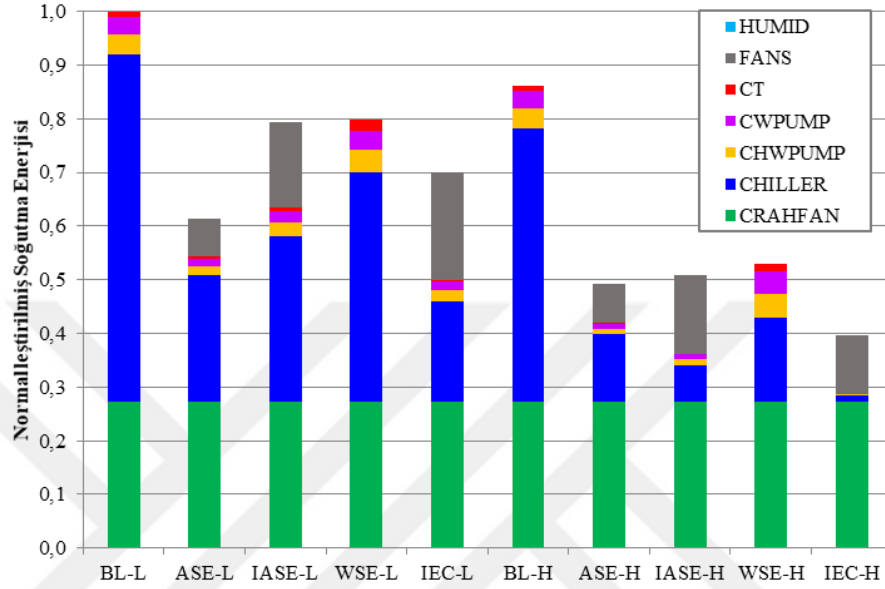
Şekil 3.2 : Geleneksel veri merkezi (BL) için *PUE* değerinin 10 şehirde değişimi.

İstanbul iklim şartlarında 10 farklı modeli kapsayan model sonuçlarıyla ilgili bir kesit Şekil 3.3'te verilmiştir.

Burada, modellere ait soğutma altyapısı enerji sarfiyatı değerleri, açık koridorlu (L-soğutma suyu sıcaklığı 10°C) geleneksel veri merkezi (BL-L) modelinin soğutma altyapısının harcadığı enerjiye göre normalleştirilmiş halleriyle sunulmaktadır. Buna göre sadece kapalı koridor (H) operasyonu tercihi ile dahi %15 civarında enerji tasarrufu sağlandığı görülmektedir.

Serbest soğutma yöntemleri arasında, açık koridor (L) operasyonu için doğrudan hava ekonomizer sistemi (ASE) en fazla enerji tasarrufu sağlayan iyileştirme yöntemi olarak öne çıkarken, kapalı koridor (H) operasyonuna geçildiğinde evaporatif destekli sistemin (IEC) daha fazla enerji tasarrufu sağladığı gözlemlenmiştir.

Genel bir bakış açısı oluşturmak gerekirse farklı serbest soğutma yöntemlerinin sağladığı tasarruflar irdelendiğinde kapalı koridor (H) operasyonunun tercih edilmesine paralel olarak enerji tasarruflarında artış gözlenmektedir. Başka bir deyişle yüksek sıcaklıkta çalışılmasına izin verilen veri merkezlerinde enerji tasarrufu bakımından olumlu sonuçlar alınmaktadır.

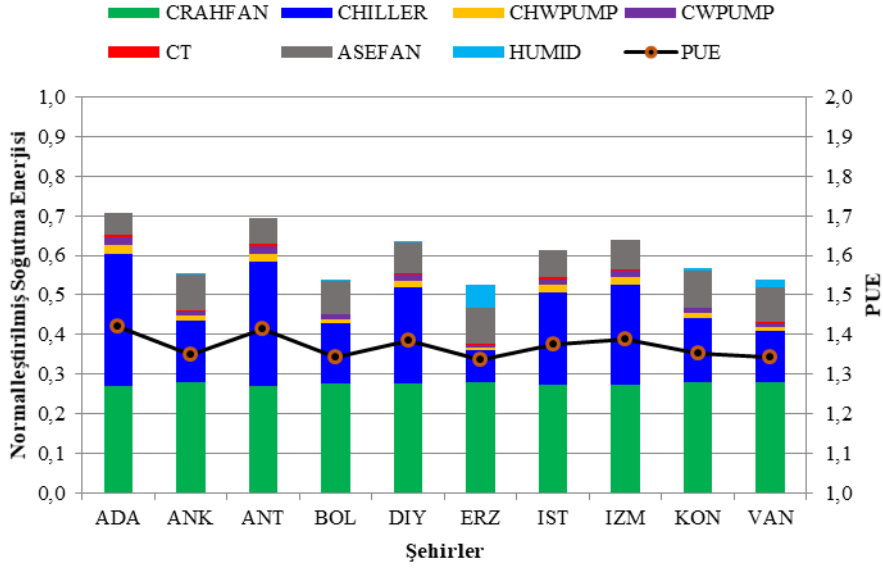


Şekil 3.3 : BL-L'ye göre İstanbul'daki farklı sistemlerin enerji sarfiyatları.

Ekonomizer yöntemlerinin farklı şehirlerde sağladıkları enerji tasarrufları aşağıda sırasıyla incelenecektir. Sonuçlar öncelikle açık koridor (L) veri merkezi uygulamalarına yönelik iyileştirmeler üzerinden sunulacak olup, koridor kapatma (H) ile elde edilecek genel iyileştirme ayrıca irdelenecektir.

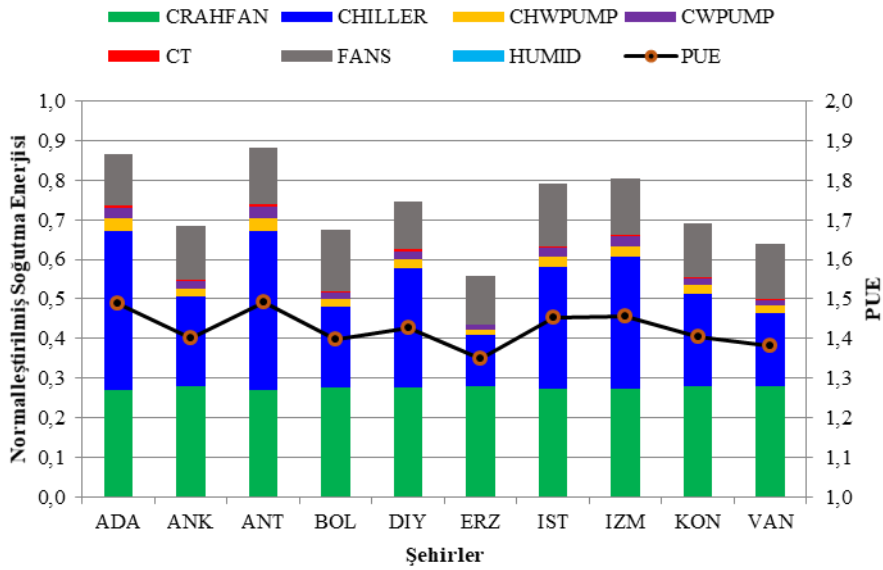
Şekil 3.4 ile ASE-L modeli için farklı şehirlerdeki normalleştirilmiş soğutma enerjisi ile *PUE* değerlerinin gerçekleşme durumları ortaya konmaktadır.

Daha önce Lee ve Chen (2016) tarafından ASE için dikkat çekilen nemlendirme ihtiyacından doğan enerji tüketiminin olumsuz etkileri [65], bu çalışmada azalmış olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumun başlıca sebebi ASHRAE'nin elektronik sistemler için tavsiye ettiği çalışma koşullarında nem oranı alt limitinin esnetilmesidir [11]. Bu esneklik, beklenildiği gibi ASE modelin tasarruf miktarını kuru ve soğuk iklimlerde artırmış olsa da Erzurum (ERZ), Van (VAN) ve az da olsa Konya (KON) şehirlerinde nem ihtiyacı oluşması sebebiyle nemlendirme ünitesi kaynaklı enerji tüketimi oluştuğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.4 : BL-L'ye göre ASE-L'nin enerji tüketimi ve PUE değerleri.

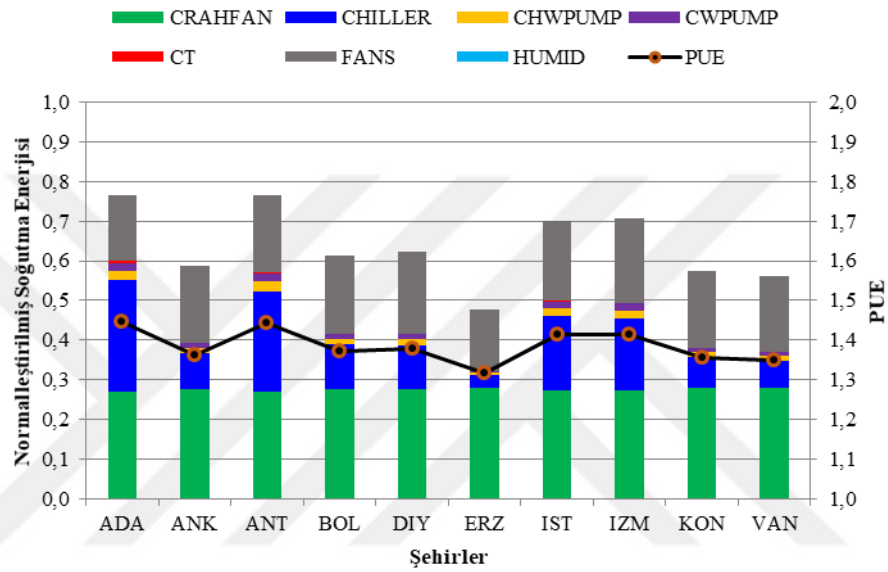
Şekil 3.5'te görüldüğü üzere çalışma prensibi duyulur ısı transferine dayanan ısı değiştiricisi nedeniyle, IASE-L performansı dış ortam kuru termometre sıcaklığıyla güçlü bir paralellik gösterir. CRAH fanlarına ilaveten, IASE bünyesindeki ısı değiştiricisi ve filtrelerin oluşturduğu basınç düşüşünü yenmek adına ihtiyaç duyulan fanların sebep olduğu enerji sarfiyatı göz ardı edilemeyecek boyuttadır. Diğer taraftan veri merkezi iç ortamı ile dış ortam koşulları birbirinden izole olduğundan, dış ortamın nem durumunun sistemin çalışma performansına direkt etkisi bulunmamaktadır.



Şekil 3.5 : BL-L'ye göre IASE-L'nin enerji tüketimi ve PUE değerleri.

IEC model fiziksel olarak IASE ile çok benzer olsa da, Şekil 3.6’da görüldüğü üzere IEC’nin kullandığı evaporatif soğutma Türkiye şartlarında IASE’den daha yüksek enerji tasarrufu sağlamaktadır. Islak termometre sıcaklığının düşük olduğu yerlerde IEC’nin sağladığı getiri diğer yöntemlere göre daha fazladır.

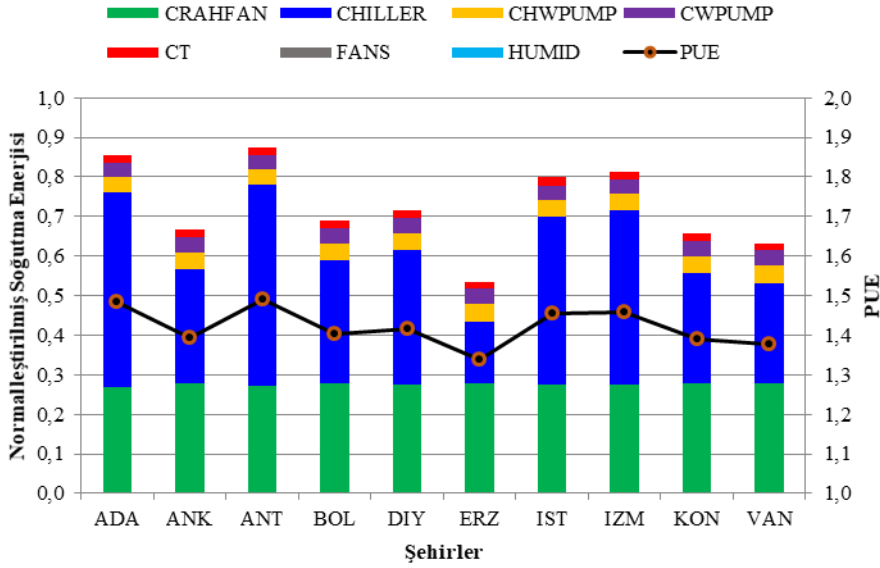
Ancak diğer taraftan, IEC için gerek duyulacak ilave bakım masrafları ve sisteme hâkim kalifiye personel bulundurma zorluğu sistemin dezavantajı olarak göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 3.6 : BL-L’ye göre IEC-L’nin enerji tüketimi ve PUE değerleri.

IEC modele benzer şekilde WSE model de evaporatif soğutma prensiplerine dayanmaktadır. Bu nedenle aynı iklim koşulları için tasarruf noktasında benzer eğilim gösterebilir de Şekil 3.7’den de görüleceği üzere mevcut sistem tasarımıyla WSE her zaman IEC’den daha verimsiz sonuçlar vermektedir. Bu durum, ısının direkt hava yerine, soğutma kulesi vasıtası ile uzaklaştırılmasının yani dolaylı ısı transferi işleminin doğal sonucudur.

WSE performansının iyileştirilmesi adına sadece plakalı ısı değiştiricisine hizmet eden ilave soğutma kulesi kullanımı veya mevcut kule kapasitesinin artırılması göz önünde bulundurulabilir. Bu haliyle WSE, alternatiflere göre daha az enerji tasarrufu sağlasa da, mevcut bir veri merkezine uygulanabilirliğinin daha kolay olması bir avantaj olarak değerlendirilebilir. İlaveten WSE model beyaz alan yerine soğutma altyapısının bulunduğu hacimlere uygulanması yönüyle, uygulanabilirlik bakımından diğer modellere nazaran daha az risk barındırmaktadır.



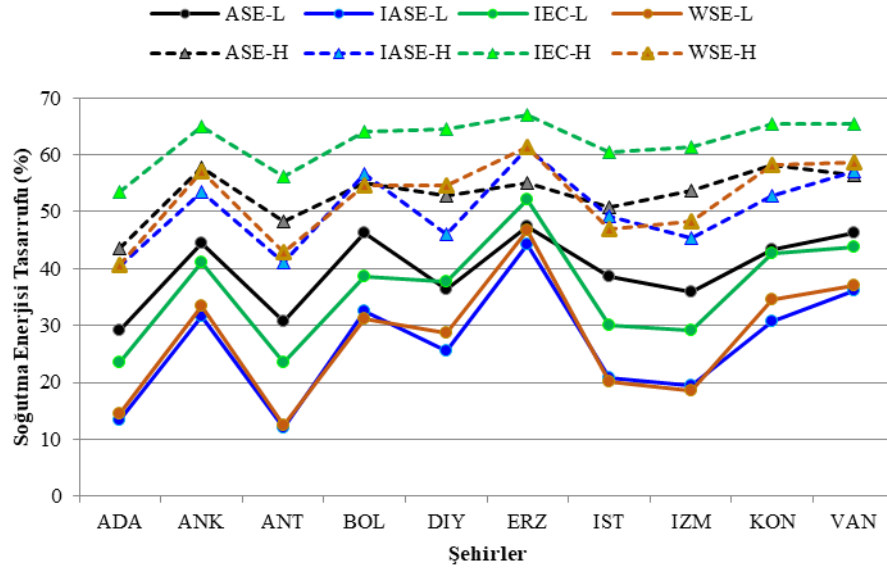
Şekil 3.7 : BL-L'ye göre WSE-L'nin enerji tüketimi ve PUE değerleri.

Şekil 3.3'de İstanbul ile ilgili verilen sonuçlarda da görüldüğü gibi kapalı koridorlu (H) veri merkezlerinde serbest soğutmayla enerji tasarruf potansiyelinin daha yüksek olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 3.8'de bu karşılaştırma diğer tüm şehirler için toplam soğutma enerjisi tasarrufu üzerinden yapılmaktadır.

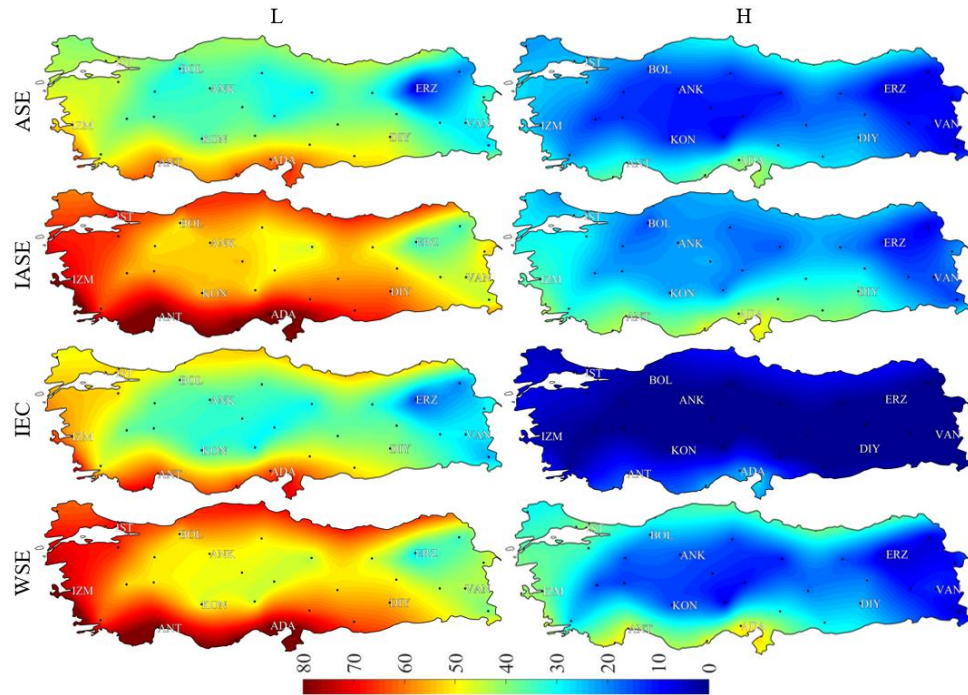
Açık koridorlu (L) sistemler için ASE 10 şehrin 8 inde en başarılı performansı gösteren ekonomizer modeli olmakla beraber, kapalı koridorlu (H) operasyona geçildiğinde diğer yöntemler kadar yüksek iyileşme göstermemektedir. Bunun temel sebebi ASHRAE tarafından tavsiye edilen çalışma koşullarında bulunan nem kısıtıdır. ASE tasarruf performansını kapalı koridor (H) için artırabilmek adına, nem alma işlemi göze alınarak, yüksek neme sahip düşük sıcaklıktaki dış ortam havasının bulunduğu koşullarda da ekonomizer kullanımı denenmiş ancak nem alma işlemlerinin daha maliyetli olduğu görülmüştür.

Kapalı koridorlu (H) çalışma durumu için gerek dış havadaki nemden etkilenmemesi gerekse ıslak termometre sıcaklığına bağlı verimli ısı transferi sayesinde IEC bütün şehirlerde en yüksek oranda enerji tasarrufu sağlayan ekonomizer yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Öyle ki en düşük enerji tasarrufu sağladığı şehir olan Adana'da (ADA) dahi tasarruf miktarı %50 mertebelerine ulaşmaktadır. Bu tasarruf değeri Erzurum (ERZ), Van (VAN), Konya (KON) gibi soğuk ve kuru iklimler için %65 ve üzeri mertebelere kadar ulaşmaktadır.



Şekil 3.8 : BL-L'ye göre ekonomizer yöntemlerinin enerji tasarrufu değerleri.

Şekil 3.9'da serbest soğutma (ekonomizer) yöntemlerinin, kapalı (H) ve açık (L) koridorlu işletme şartlarında Türkiye'nin 40 şehri için chillerlerin kısmi ya da tam yükte yıllık çalışma durumları renklendirilerek gösterilmiştir. Tüm ekonomizer yöntemleri, açık koridorlu (L) işletme şartlarında, güney sahil şeridi için yıllık %60 civarında chillerlere ihtiyaç duymaktadır. Sadece ASE modeli, Erzurum (ERZ) şehri için yıllık %10 chiller kullanımı değerine ulaşabilmektedir.



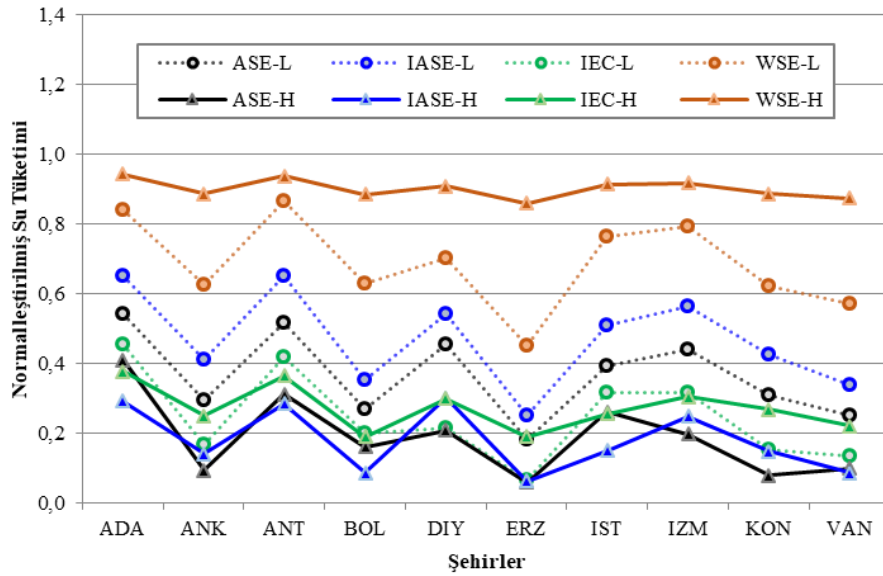
Şekil 3.9 : Türkiye'nin 40 şehri için yıllık chiller çalışma saatleri yüzdesi.

Kapalı koridorlu (H) işletme şartlarında tüm ekonomizer yöntemleri enerji tasarrufu adına büyük gelişim göstermişlerdir. Bu yöntemler arasında IEC model çok sıcak ve nemli iklimlere sahip birkaç şehir dışında tüm bölgelerde yıllık sadece %10 oranında chiller kullanımı değerini yakalayabilmektedir.

Buraya kadar bahsi geçen enerji (elektrik) tasarrufu sonuçlarına göre serbest soğutma (ekonomizer) yöntemlerine ilişkin potansiyellerin ortaya konması mümkündür. Ancak elektrik tüketiminin yanında su sarfiyatının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu bağlamda kurgulanan modellerde soğutma kulesi, IEC su püskürtme sistemi ve gerektiğinde kullanılan nemlendiricilerin su tüketimi değerleri de dikkate alınarak hesaplara katılmıştır.

Şekil 3.10'da farklı şehirlerde farklı modeller için BL-L modelin tüketimine göre normalleştirilmiş su sarfiyatları verilmektedir. WSE model en agresif su kullanımının görüldüğü serbest soğutma yöntemi olarak görülmektedir ki bu modelde su tüketiminin tamamı soğutma kulesinde gerçekleşmektedir.

Yine evaporatif destekli bir sistem olan IEC modelde, özellikle chiller ve soğutma kulesine duyulan ihtiyacın önemli ölçüde azalmasının getirdiği bir sonuç olarak, IEC'nin su sarfiyatını göz ardı edilebilir hale geldiği söylenebilir.



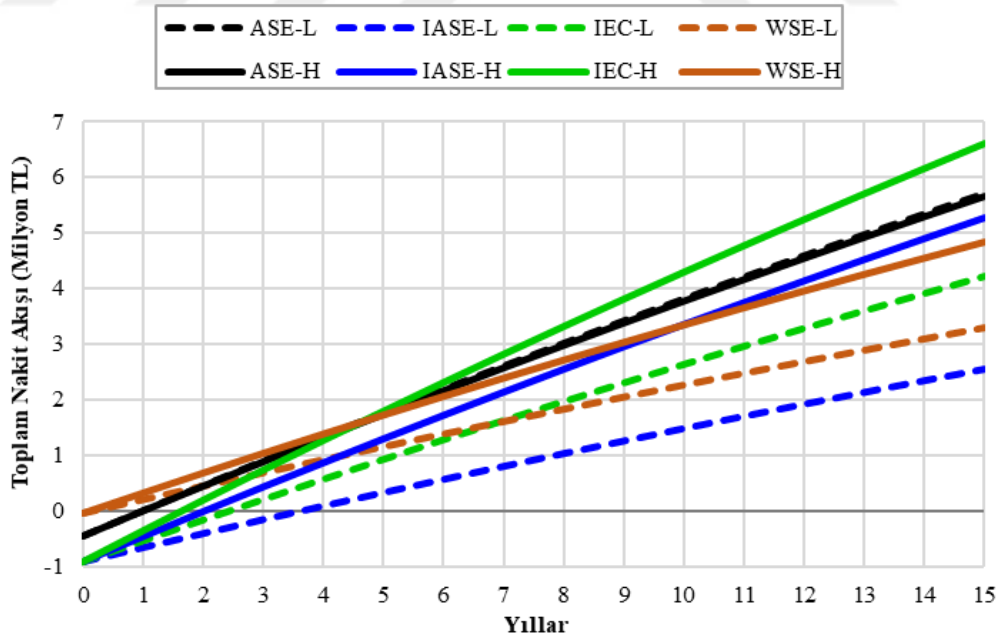
Şekil 3.10 : BL-L'ye göre ekonomizer yöntemlerinin su tüketim değerleri.

3.2 Ekonomik Analiz

Bu kısımda 10 şehir için ayrı ayrı yapılan yıllık elektrik ve su tasarrufuna ilaveten, ekonomizer yöntemlerinin ilk yatırım, bakım-onarım ve malzeme giderleri gibi çıktıları da göz önünde bulundurularak oluşturulmuş 15 yıllık TSO analiz sonuçları verilmeye çalışılacaktır.

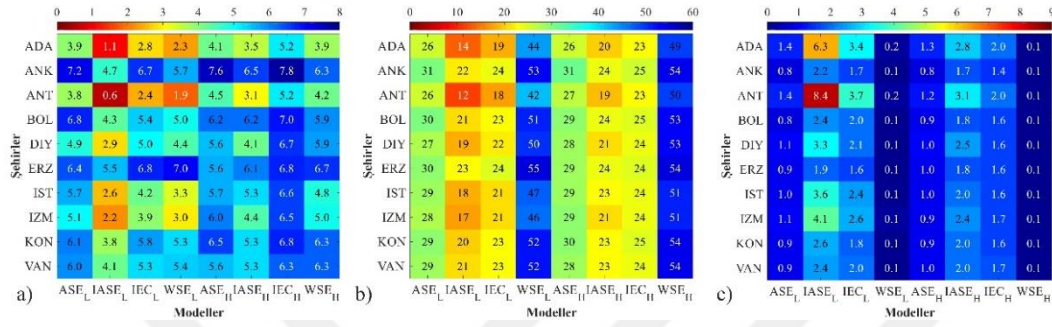
Şekil 3.11’de İstanbul (İST) şehri için, ekonomizer yöntemlerinin geleneksel veri merkezlerine (BL) göre açık (L) ve kapalı (H) koridorlu çalışma şartları altında oluşturulmuş birikimli indirgenmiş nakit akışı verilmiştir. Buna göre tüm ekonomizer yöntemlerinde geri ödeme süresi 4 yıldan önce gerçekleşmektedir. Diğer ekonomizer yöntemlerine göre ilk yatırım maliyetlerinin düşüklüğü sayesinde WSE ve ASE için geri ödeme süresi 1 yıldan daha erken bir sürede gerçekleşmektedir.

Sonuçlarda dikkat çekici bir durum da ASE-L ve ASE-H ekonomizer yöntemleri için nakit akış diyagramının benzer çıkmış olmasıdır. Aslında bu beklenen durumun sebebi ASE-L modelin BL-L modele göre sağladığı elektrik ve su tasarrufunun ASE-H modelin BL-H modele göre sağladığı tasarruftan daha fazla olmasıyla açıklanabilmektedir.



Şekil 3.11 : BL’ye göre ekonomizer yöntemlerinin İST nakit akış diyagramı.

Şekil 3.12 de tüm modellerin net bugünkü değerleri (NBD) Milyon TL olarak, değiştirilmiş iç karlılık oranları (DİKO) yüzde olarak ve indirgenmiş geri ödeme süreleri yıl olarak, geleneksel veri merkezi (BL) sonuçlarına göre, açık (L) ve kapalı (H) koridorlu işletme şartları için verilmiştir. Renklendirmeler ile anlaşılabilirliği kolaylaştırmak adına en kötü durum için kırmızı en iyi durum için mavi renk tercih edilmiştir.



Şekil 3.12 : a)NBD (Milyon TL), b)DİKO (%), c)Geri ödeme süresi (yıl).

Bu bilgiler ve sonuçlar ışığında net bugünkü değerlere (şekil 3.12 a) bakıldığında 15 yıl içerisinde tüm yöntemlerde 2,5 Milyon TL rakamının üzerinde sonuçlar elde edildiği görülmektedir. IEC ekonomizer yöntemi kapalı koridorlu (H) işletme şartlarında tüm şehirler için en iyi NBD değerlerine haizdir.

Açık koridorlu (L) işletme şartlarına bakıldığında Erzurum (ERZ) ve Van (VAN) dışında tüm şehirlerde ASE-L ve IEC-L modellerin ön plana çıktığı görülmektedir. Erzurum ve Van özelinde bu modellere ek olarak WSE-L model de önemli bir oyuncu olarak sahne almaktadır.

DİKO değerleri dikkate alındığında (şekil 3.12 b) WSE model, diğer ekonomizer yöntemlerine göre ilk yatırım maliyetinin düşük olmasının getirdiği avantaj ile ön plana çıkmaktadır. Öyle ki gerek DİKO gerekse tüm şehirlerde 1 yıldan az olan indirgenmiş geri ödeme süresiyle (şekil 3.12 c) rakiplerinin önündedir. Hava temelli ekonomizer yöntemleri veri merkezi içerisinde bulunan CRAH ünitelerine bütünleştirilirken, dolaylı su ekonomizer yöntemi (WSE) chiller ve soğutma kulesi arasında modifikasyonlar yapılarak devreye alınır. Bu durum ekonomik avantaj sağlamakla beraber söz konusu modifikasyon çalışmalarının beyaz alan dışında yapıyor olması ile kritik hata yapılması riskini de minimize etmektedir.

Açık koridorlu (L) işletme şartlarında ısrarcı olunması ve dış ortam havasının dikkatli filtrelenmesi ile ASE-L modeli çok avantajlı bir yöntem olarak düşünülebilir. Buna

karşın hava temelli ekonomizer modelleri arasında IEC açık ara önde gözükmektedir. Bunun başlıca sebebi evaporatif soğutma prensbine dayanan ısı değiştiricisi kullanılmasıdır. IEC modelin bakım masraflarında yapılacak iyileştirmelerin, günün sonunda IEC yatırımın tercih edilebilir olmasına değerli katkılar sağlayacağı açıktır.

Bu sonuçlar ışığında örneğin kapalı koridorlu IEC için 15 yılın sonunda elde edilecek kazanç WSE ye göre her şehirde daha fazla olduğu halde değiştirilmiş iç kârlılık oranı değerlerine bakıldığında yatırım kararı WSE lehine dönmektedir. Enerji tasarrufuna bakıldığında diğer ekonomizer yöntemlerinin gerisinde kalan WSE'nin, TSO analiz sonuçlarına göre yüksek kârlılık oranıyla yatırım yapılması uygun yöntemler arasında bulunması dikkat çekicidir. Bu durum tasarruf bakımından diğer yöntemlere göre daha az fayda sağlamasına rağmen, WSE'nin ilk yatırım ve bakım maliyeti olarak çok daha uygun olmasıyla alakalıdır.

Görüldüğü gibi salt enerji tasarrufu analizleri sistem performansları için fikir verici olsa da TSO analizi ile tamamlanmamış çalışmalar karar vericileri yanlış yönlendirmeye açık sonuçlar barındıracaktır.

Şekil 3.12'de sunulan sonuçlar %8'lik bir indirgeme oranı kabulü ile ortaya konulmuştur. Şirket politikalarına göre farklılık gösteren indirgeme oranları için analizler yenilendiğinde farklı yönde yatırım kararları çıkması muhtemeldir. Örneğin açık koridorlu (L) çalışma şartlarında %10 - %15 bandında bir indirgeme oranı ile analiz tekrarlandığında, Antalya (ANT) ve Adana (ADA) için IASE modeli yatırım yapılabilir yöntemler arasında kendine yer bulamayacaktır.

Benzer şekilde bölgesel su birim fiyatları da yatırımlara karar verilmesi noktasında kritik rol oynayabilmektedir. Örneğin Ankara (ANK) şehri, Erzurum (ERZ) şehrine kıyasla enerji tasarrufu bakımından çoğu zaman daha kötü performans sergilese de NBD çıktılarına bakıldığında kapalı koridor (H) çalışma şartlarında tercih edilebilir sonuçlar almayı başarmaktadır. Bunun sebebi Ankara'daki su birim fiyatlarının Erzurum'a kıyasla yüksek olmasıdır. Maliyet girdileri nispeten yüksek olan bölgelerde yapılacak her tasarruf, ekonomik analizlerde karşılığını daha belirgin bulmaktadır.

Dikkat çekebilecek bir diğer husus olarak, tasarruf bakımından en gözde yöntem olan IEC model; yüksek DİKO ve düşük geri ödeme süresi politikasını benimseyen işletmeler için, ASE ve WSE gibi düşük geri ödeme sürelerine sahip rakiplerinin karşısında 1,5 – 3,7 yıl aralığındaki geri ödeme süresi ile geri planda kalabilmektedir.



4. SONUÇ

Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan Doğrudan Hava Ekonomizeri (ASE), Dolaylı Hava Ekonomizeri (IASE), Dolaylı Hava Ekonomizeri - Evaporatif Destekli (IEC) ve Dolaylı Su Ekonomizeri (WSE) gibi serbest soğutma yöntemlerinin Türkiye'nin 10 şehrinde 1 MW IT yüküne sahip geleneksel bir veri merkezi için sağlayacağı enerji tasarruf potansiyelleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Toplam sahip olma analizi hesaplamaları ile de sistemlerin ilk yatırımlarına bağlı ekonomik etkileri de ortaya konmuştur. Günün sonunda ekonomizer sitemlerinin hem enerji tasarruf potansiyelleri hem de ilk yatırım ve işletme maliyetleri bakımında kullanım ömürleri boyunca devam eden bütünsel hesaplamalar yapılarak her bir iklim sınıfı için en kârlı sistemin ortaya konması hedeflenmiştir.

Açık koridorlu (L) sistemlerde ASE model en iyi performansı gösteren serbest soğutma (ekonomizer) yöntemi olarak karşımıza çıkmakta iken, kapalı koridorlu (H) sistemlerde diğer yöntemler kadar fazla performans artışı gösterememektedir. ASE'nin kapalı koridorlu (H) sistemler için performansını artırmak adına ekonomizer çalışma kısıtları gevşetilerek nemli havanın içeri alınmasına izin verilmiş olsa da, elde edilen sonuçlar göstermiştir ki nemli havayı içeri alarak nem alma operasyonuna başvurulması, nemli havayı içeri almamaktan daha zarar verici sonuçları beraberinde getirmiştir. Buradan hareketle ASE modeli çalıştırılırken tavsiye edilen çalışma koşullarının üzerinde neme haiz havalardan – düşük sıcaklıkta olsalar dahi – faydalanılmamış ve dışarıda bırakılmıştır.

Sonuçlardan da görüldüğü üzere kapalı koridorlu (H) sistemlerde serbest soğutmayla enerji tasarruf potansiyeli daha yüksektir. Hem dış hava neminden etkilenmemesi hem de yaş termometre sıcaklığına bağlı yüksek verimli ısı değiştiricisi sayesinde IEC özellikle kapalı koridorlu (H) veri merkezi için tüm şehirlerde en yüksek oranda enerji tasarrufu potansiyeline sahiptir.

Her ne kadar gelişen teknoloji ile beraber tavsiye edilen çalışma koşullarında iyileştirmeler ve geliştirmeler yaşansa da özellikle kuru iklimlerde ASE'nin nem ihtiyacı az miktarda da olsa halen bulunmaktadır.

Bunun yanında dış ortamla hava alış verişinin direkt yapılmadığı dolaylı serbest soğutma sağlayan IASE/IEC gibi diğer yöntemlerde nemlendirme ihtiyacı bulunmamaktadır. Hava ekonomzierli serbest soğutma sistemlerine göre en büyük üstünlüğü mevcut yapıya uygulanabilirlik kolaylığı olan su ekonomizerli serbest soğutma yöntemleri ise enerji tasarrufu bakımından görece geri kalmaktadır.

İklim şartlarından farklı şekillerde etkilenen serbest soğutma yöntemlerinin enerji tasarrufu performansları önemli bir ölçüt olsa da, bu sistemlerin tercih edilebilir olup olmadığı hakkında daha somut sonuçlara ulaşmak için toplam sahip olma maliyet analizi vb. diğer parametrelerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Türkiye'nin 10 şehrinde NBD, İKO ve indirgenmiş geri ödeme süresi yöntemleri dikkate alınarak yapılan ekonomik analiz sonuçlarına göre örneğin kapalı koridorlu (H) operasyonda çalıştırılmış IEC model için 15 yılın sonunda elde edilecek kazanç WSE'ye göre her şehirde daha fazladır. Bunun yanında özellikle DİKO ve indirgenmiş geri ödeme süresi değerlerine bakıldığında yatırım kararı WSE lehine dönmesi beklenmektedir. Enerji tasarrufuna bakıldığında diğer ekonomizer yöntemlerinin gerisinde kalan WSE'nin, TSO analiz sonuçlarına göre yüksek kârlılık oranıyla yatırım yapılması uygun yöntemler arasında bulunması dikkat çekicidir. Bu durum tasarruf bakımından diğer yöntemlere göre daha az fayda sağlamasına rağmen, WSE'nin ilk yatırım ve bakım maliyeti olarak çok daha uygun bir pozisyonda olmasıyla açıklanabilir. Diğer taraftan ilk yatırım için kaynak sorununun yaşanmadığı durumlarda 15 yıllık analize göre en yüksek NBD sonucunu veren kapalı koridorlu (H) IEC en kazançlı yatırım olarak değerlendirilebilir.

Modellerin ekonomik analizleri yapılırken açık koridor (L) işletme şartlarından kapalı koridor (H) işletme şartlarına geçişi sağlayan koridor kapama vb. imalatların ekonomik etkileri dikkate alınmamıştır. Bu çalışma, yeni nesil serbest soğutma (ekonomizer) yöntemlerinin mevcut veri merkezlerinin iyileştirme çalışmalarında göstereceği performansların irdelenmesi ya da yeni yapılacak veri merkezlerinde en uygun yöntemin belirlenebilmesi adına güncellenerek geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **ZDNet** (2013). “The 21st Century Data Center: An Overview”, April 2, <http://www.zdnet.com/article/the-21st-century-data-center-an-overview>.
- [2] **Research and Markets**, (2015). “Data Center Power Market by Solution Type (Power Distribution and Measurement, Power Back-Up, and Cabling Infrastructure), by Service Type, by End User Type, by Vertical and by Region - Global Forecast to 2020”, at: http://www.researchandmarkets.com/research/bnfn4f/data_center_power
- [3] **Keating, D.**, (2016). “How green is your internet?”, available at: <http://www.dw.com/en/how-green-is-your-internet/a-36691833>
- [4] **Data Center Dynamics** (2013). “DCD Intelligence: 2013 Census Report, Global Data Center Power 2013”, <http://www.datacenterdynamics.com/download?ac=9053>.
- [5] **Data Center Dynamics** (2013). “DCD Intelligence: 2013 Census Report, Global Data Center Investment 2013”, <http://www.datacenterdynamics.com/download?ac=9055>.
- [6] **Data Center Dynamics** (2011). “DCD Industry Census 2011: Introduction”, <http://archive.datacenterdynamics.com/white-papers/2011/11/dcd-global-census-market-growth-figures>.
- [7] **Data Center Dynamics** (2011). “DCD Industry Census 2011: Market Profiles”, <http://archive.datacenterdynamics.com/white-papers/2011/02/dcd-global-census-market-profile-report>.
- [8] **The Green Grid** (2007). “The Green Grid Data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCiE White Paper #6”, <http://www.thegreengrid.org/Global/Content/white-papers/The-Green-Grid-Data-Center-PowerEfficiency-Metrics-PUE-and-DCiE>.
- [9] **Shehabi, A., S. Smith, D. Sartor, R. Brown, M. Herrlin, J. Koomey, E. Masanet, N. Horner, I. Azevedo & W. Lintner** (2016). “United States Data Center Energy Usage Report,” Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.
- [10] **Tier Standardı Nedir? Tier Standartlarının Farkları Nelerdir?** <<http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/tier-standardı-nedir-tier-standardlarının-farkları-nelerdir-/18754#ad-image-0>>, erişim tarihi 21.03.2018.
- [11] **ASHRAE** (2015). Thermal Guidelines for Data Processing Environments, 4rd Edition, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

- [12] **Patankar, S.V.** (2010). "Airflow and cooling in a data center", J. Heat Transfer 132 (2010). 73001-1-73001-17.
- [13] **ASHRAE white paper** (2011). "Gaseous and Particulate Contamination Guidelines for Data Centers", available at <http://tc99.ashraetcs.org/documents.html>
- [14] **Sheabi, A., Ganguly, S., Traber, K., Price, H., Horyath, A., Nazaroff, W.W. & Gadgil, A.J.** (2008). Energy implications of economizer use in California data centers, Berkeley, CA, Lawrence Berkeley, National, Laboratory.
- [15] **Ham, S. W, Park, J. S., Jeong, J. W.** (2015). Optimum supply air temperature ranges of various air-side economizer in a modular data center, Appl. Therm. Eng. 77; 163-179.
- [16] **Agrawal, A., Khichar, M. & Jain, S.** (2016). Transient simulation of wet cooling strategies for a data center in worldwide climate zones, Energy and Buildings, 127:352-359.
- [17] **Gözcü, O., Ozanda B., Carfi M.U. & Erden H.S.** (2017). "Worldwide Energy Analysis of Major Free Cooling Methods for Data Centers" in Proceedings of IEEE IThERM 2017, Orlando, FL May 30-June 2.
- [18] **Salim, M. & Tozer, R.** (2010). "Data Centers' Energy Auditing and Benchmarking-Progress Update," ASHRAE Transactions, Vol. 116(1), pp. 109-117.
- [19] **Seymour, M.** (2015). Chapter 17: Computational fluid dynamics applications in data centers. In: Geng, H. (editor). Data Center Handbook. Hoboken, New Jersey, ABD: John Wiley & Sons, pp. 313-341. doi:10.1002/9781118937563.
- [20] **Patterson, M.** (2008). The effect of data center temperature on energy efficiency, 11th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM 2008), Orlando, FL, ABD, pp. 1167-1174. doi: 10.1109/ITHERM.2008.4544393.
- [21] **Braun, J.E.** (1987). Performance and control characteristics of large central cooling systems. ASHRAE Transactions 93 (1), 1830-52.
- [22] **Demetriou, D.W., Khalifa, H.E., Iyengar M. & R. Schmidt** (2011). Development and experimental validation of a thermohydraulic model for data centers. HVAC&R Research 17(4):540.55.
- [23] **Erden, H.S., Yildirim, M. T., Koz, M. & Khalifa, H.E.** (2016). Experimental Investigation of CRAH Bypass for Enclosed Aisle Data Centers" in Proceedings of IEEE IThERM 2016, Las Vegas, NV, May 31-June 3.
- [24] **Hauer, A. & Brooks, J.** (2012). Fan motor efficiency grades in the European market, AMCA Inmotion, 2:14-20.
- [25] **Emerson Network Power** (2008). Liebert CW System Design Manual – 26-181kW, 50&60Hz.
- [26] **Taylor, S.** (2011). Optimizing the design and control of chilled water plants part 3: pipe sizing and optimizing ΔT ." ASHRAE Journal December.

- [27] **ASHRAE, ASHRAE Standart 90.1** (2013). Energy Standart for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings published by ASHRAE, Inc.
- [28] **Braun, J.E., Klein, S.A. & Mitchell, J. W.** (1989). Effectiveness models for cooling tower and cooling coils, ASHRAE Transactions 95(2), 1989, 164-74.
- [29] **Simpson, W.M. & Sherwood, T.K.** (1946). Performance of Small Mechanical Draft Cooling Towers, Refrigeration Engineering.
- [30] **ASHRAE**. Particulate and Gaseous Contamination in Datacom Environments, 2nd Edition, 2013, Atlanta: American Society, of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [31] **Nordmann**. ES4, [Online] Available at: <http://nordmann-engineering.com/en/pdf/brochure-es4-en/?wpdmdl=1109>.
- [32] **TRANE** (2015). Performance Climate Changer™ Air Handlers, [Online] Available at: https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commirical/global/products-systems/equipment/air-handling/cataloged-air-handlers/performance/CLCH-PRC022B-EN_092015_Performance%20CSAA%20catalog.pdf
- [33] **Ebm-papst** (2016). EC centrifugal fans-RadiPac, [Online] Available at: [http://www.ebmpapst.se/sv/dat/site_common/upload/EC centrifugal fans-RadiPac 2016.pdf](http://www.ebmpapst.se/sv/dat/site_common/upload/EC_centrifugal_fans-RadiPac_2016.pdf)
- [34] **Dunnavant, K.** (2011). Data Center Heat Rejection: Indirect Air-Side Economizer Cycle, ASHRAE Journal, vol. 53, no. 3, March.
- [35] **De Antonellis, S., Joppolo, C.M., Liberati, P., Milani, S. & Molinaroli, L.** (2016). Experimental analysis of a cross flow indirect evaporative cooling system, Energy and Buildings, 121, 130-138.
- [36] **Bell & Gossett**. (2009). Plate and Frame Heat Exchanger Specification Sheet.
- [37] **Url-1** <<http://www.meteonorm.com>>, meteonorm dataset, erişim tarihi 29.03.2017.
- [38] **ASHRAE Standart 169**, (2013). Climatic Data for Building Design Standart published by ASHRAE, Inc.
- [39] **Akgüç, Ö.** (1998). Finansal Yönetim (8. baskı). İstanbul: Avcıol Basım Yayın.
- [40] **Kierulff, H.** (2008). MIRR: A better measure, Business Horizons, 51(4), pp. 321-329
- [41] **Mayes, T.R. ve Shank T.M.** (2018). Financial Analysis with Microsoft Excel 2016, Boston, MA, ABD. Cengage Learning.
- [42] **Çevre ve Şehircilik Bakanlığı** (2007). 2017 yılı inşaat ve tesista birim fiyatları (1. baskı). Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- [43] **Aynacı, T.** (2017). Kişisel irtibat, Flaktgroup.
- [44] **Evrin, Y.** (2017). Kişisel irtibat, Ecoserv.
- [45] **Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi** (2017). Hakkımızda. 2017, <https://www.teias.gov.tr/tr/kurumsal/>

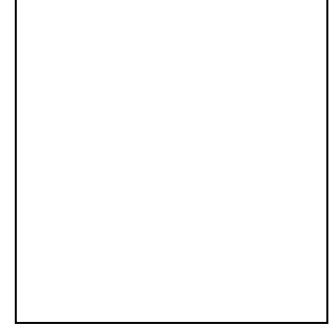
- [46] **Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi** (2015). Bölge Müdürlükleri. 2016, http://www.tedas.gov.tr/#!/tedas_kurumsal_koordinatorlukler
- [47] **Türkiye Cumhuriyet Başbakanlık Mevzuat Geliştirme Genel Müdürlüğü Yayınları** (2013). Elektrik piyasası kanunu. 2017, <Http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/03/20130330-14.htm>
- [48] **Enerji Piyasası Denetleme Kurumu** (2016). Elektrik faturalarına esas tarife tabloları. 2016, <http://www.epdk.org.tr/TR/Dokumanlar/TDB/Elektik>
- [49] **Türkiye Cumhuriyet Başbakanlık Yayınları** (1968). Belediye teşkilatı olan yerleşim yerlerine içme, kullanma ve endüstri suyu temini hakkında kanun. 2016, <http://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.1053.pdf>
- [50] **Adana Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü** (2016). Tarife listesi. 2016, <http://www.adana-aski.gov.tr/web/tarifelistesi.aspx>
- [51] **Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü** (2016). Su ve atık su tarifesı. 2016, <http://www.aski.gov.tr/tr/846-tarie-ve-ucretler-icerik.html>
- [52] **Antalya Su ve Atık Su İdaresi Genel Müdürlüğü** (2016). Tarifeler. 2016, <https://www.asat.gov.tr/tr/kurumsal/tarifeler-45.html>
- [53] **Unkar, F.** (2016). Kişisel irtibat, Türk Telekomikasyon A. Ş.
- [54] **Diyarbakır Su ve Kanalizasyon İdaresi** (2016). Su ve atık su tarifesı. 2016, <http://www.diski.gov.tr/h-rehber/hizmet.asp?cid=3838>
- [55] **Erzurum Su ve Kanalizasyon İdaresi** (2016). Su tarifeleri. 2016, <http://eski.gov.tr/tarife>
- [56] **İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi** (2016). Su birim fiyatları. 2016, <https://www.iski.gov.tr/web/tr-TR/musteri-hizmetleri-su-birim-fiyatlari>
- [57] **İzmir Su ve Kanalizasyon İdaresi** (2016). Su ve atık su tarifesı. 2016, <http://www.izsu.gov.tr/Pages/standartPage.aspx?id=65>
- [58] **Konya Su ve Kanalizasyon İdaresi** (2016). Abonelere uygulanacak su ve atık su tarifeleri. 2016, <http://www.koski.gov.tr/mAboneHizmetleri/tarife.php?pd=3%7C%7C72&>
- [59] **KMPG Vergi** (2016). Yıllar itibarıyla günlük ve aylık asgari ücretler. 2016, <https://www.kpmgvergi.com/PratiBilgiler/SosyalSigortalarVeIsHukukuBilgileri/Pages/Yillar-İtibariyla-Gunluk-Ve-Aylik-Asgari-Ucretler.aspx>
- [60] **Spangler, R. & Jeffers, G.** (2010). Total cost of ownership comporasion of air economizers to other energy saving teqhniques in data center applications Ashrae, 116 (2), 82-89.
- [61] **Ganguly, S., Shehabi, A., Tschudi, W.F. & Gadgil, J.A.** (2009). Impact of Air Filtration on the Energy and Indoor Air Quality of Economizer-based Data Centers in the PG&E Territory. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

- [62] **Türkiye İstatistik Kurumu** (2016). Enflasyon ve fiyat. 2016, <http://tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>
- [63] **American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning** (2017). Service life data query.2017, http://xp20.ashrae.org/database/system_service_life.asp?selected_system_type=1
- [64] **Klein, S.A., Beckman, W.A., Mitchell, J.W., & Duffie, J.A.** (2004). TRNSYS 16-transient system simulation program, user manual. Solar Energy Laboratory.
- [65] **Lee, K.P., & Chen, H.L.** (2016). Modelling and experimental study of plate type indirect evaporative cooler (IEC) for energy recovery in hot and humid regions, The Hong Kong Polytechnic University





ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ozan GÖZCÜ
Doğum Tarihi ve Yeri : 29.03.1985 - ÜSKÜDAR
E-posta : gozcuo@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2005(1 ay) yılında Ford-Otosan Ürün Geliştirme Müdürlüğü' nde staj yaptı.
- 2006(1 ay) yılında Türk Telekomünikasyon A.Ş.' de Fabrika Müdürlüğü' nde staj yaptı.
- 2007(halen) Türk Telekomünikasyon A.Ş. Genel Müdürlük İnşaat Direktörlüğünde Mekanik Tesisat Uzmanı olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gözcü, O. ve Erden, H. S.** 2017. Veri Merkezi Serbest Soğutma Sistemlerinin Türkiye'nin İklim Şartlarındaki Enerji Analizi. *1. Ulusal Bulut Bilişim ve Büyük Veri Sempozyumu (B3S'17)*. Ekim 19-20, 2017 Antalya, Türkiye.
- **Gözcü, O., Özada, B., Carfi, M. U., ve Erden, H. S.** 2017. Worldwide Energy Analysis of Major Free Cooling Methods for Data Centers. *IEEE ITherm Conference*. Mayıs 30 - Haziran 2, 2017 Orlando, FL, ABD.
- **Gözcü, O. ve Erden, H. S.** 2019. Energy and Economic Assessment of major free cooling retrofits for Data Centers in Turkey, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 27, no. 3, pp. 2197 – 2212.