



Energy and economic analysis of the bypass method for the computer room air conditioning units of a small data center

Hamza Salih Erden^{1*}, İsmail Türkmen²

¹Department of Informatics Applications, Institute of Informatics, Istanbul Technical University, 34469, Sariyer, Istanbul, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yildiz Technical University, 34349, Besiktas, Istanbul, Turkey

Highlights:

- CRAH bypass method for the optimization of the cooling infrastructure energy consumption
- Reduced-order modeling for optimization
- Economic analysis of the CRAH bypass method

Keywords:

- Energy efficiency
- Data centers
- Cooling infrastructure
- Economics
- Modeling & optimization

Article Info:

Research Article
Received: 16.03.2021
Accepted: 12.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.897270

Acknowledgement:

The authors acknowledge the financial support provided by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) with project 118M238.

Correspondence:

Author: Hamza Salih Erden
e-mail: erdenh@itu.edu.tr
phone: +90 212 285 6648

Graphical/Tabular Abstract

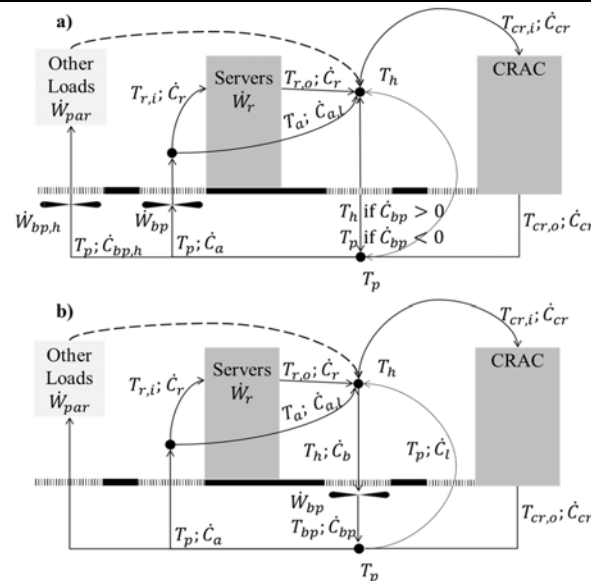


Figure A. Representative air and heat flow diagrams of (a) iBP and (b) fBP method models

Purpose: This study offers an energy and economic feasibility study of the computer room air conditioning (CRAC) bypass (BP) methods for a small operational data center using reduced-order thermodynamic modeling and optimization approaches suggested in the literature.

Theory and Methods:

Earlier optimization studies utilized flow network modeling (FNM) at room level and thermodynamic modeling at the cooling infrastructure level to investigate the energy saving potential of the CRAC BP method for data centers. FNM worked well in predicting the cooling power at various BP fractions. While existing studies are either on hypothetical data centers or experimental setups, there is no considerable work on the energy and economic feasibility of the method in an operational data center.

Results:

Even though the number of BP fans has a minor role in the energy savings by the BP method, the impact on the economics of the application is dramatic. The net present values of the investments of the induced and forced BP methods in the pilot data center with respectively 8 and 7 bypass fans are at least 2.5 million TL. The payback period of the investment is 1.6 years with a modified rate of return of more than 25 percent.

Conclusion:

The amount of leakage in the data center and number of BP fans only slightly affect the energy performance of the bypass method. However, the economic feasibility of the bypass method is directly related to the number of fans required by the design. If the air handling units permit, using variable speed fans further improves the economics of the application.



Küçük bir veri merkezinin iklimlendirme ünitelerine yönelik baypas yönteminin enerji ve ekonomik analizi

Hamza Salih Erden^{1*}, İsmail Türkmen²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı, 34469 Sarıyer, İstanbul, Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Soğutma altyapısı optimizasyonu için CRAH baypas yöntemi
- Optimizasyon için indirgenmiş modelleme
- CRAH baypas yönteminin ekonomik analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 16.03.2021
Kabul: 12.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.897270

Anahtar Kelimeler:

Enerji verimliliği,
veri merkezleri,
soğutma altyapısı,
ekonomi,
modelleme ve optimizasyon

ÖZ

Önceki optimizasyon çalışmaları sistem odası kliması (computer room air handling, CRAH) baypas (BP) yönteminin veri merkezlerindeki enerji tasarruf potansiyelini değerlendirmek için oda seviyesinde akış ağı modelleme ve soğutma altyapısı seviyesinde termodinamik modellemeyi harmanlayan indirgenmiş model yaklaşımı kullanmışlardır. Akış ağı modellerini barındıran termodinamik modeller farklı BP oranları için soğutma altyapı gücünü tahmin etmekte iyi bir iş çıkarmıştır. Ancak yapılan çalışmalar varsayımsal veri merkezleri ya da deneysel düzeneklerle ilgili olup yöntemin gerçek ve işler bir veri merkezinde kullanılabilirliğine yönelik kayda değer bir çalışma bulunmamaktadır. Literatürdeki bir diğer eksiklik de yöntemin ekonomik gereksinimleridir. Bu çalışmada, literatürde önerilen indirgenmiş modelleme yaklaşımlarını kullanarak klima BP yöntemlerinin (itişli ve çekişli) çalışan bir veri merkezine uygulanabilirliği üzerine değerlendirmeler yapılmıştır. Çeşitli senaryoların enerji ve ekonomik analizi neticesinde klima BP yönteminin fizibilitesinin, tasarımın ihtiyaç duyduğu fan sayısına doğrudan bağlı olduğu sonucuna ulaşılmış ve çalışan bir veri merkezi için uygulama önerilerinde bulunulmuştur.

Energy and economic analysis of the bypass method for the computer room air conditioning units of a small data center

H I G H L I G H T S

- CRAH bypass method for the optimization of the cooling infrastructure energy consumption
- Reduced-order modeling for optimization
- Economic analysis of the CRAH bypass method

Article Info

Research Article
Received: 16.03.2021
Accepted: 12.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.897270

Keywords:

Energy efficiency,
data centers,
cooling infrastructure,
economics,
modeling & optimization

ABSTRACT

Earlier optimization studies utilized reduced-order modeling approach combining flow network modeling at room level and thermodynamic modeling at the cooling infrastructure level to investigate the energy saving potential of the computer room air handling (CRAH) bypass (BP) method for data centers. Flow network modeling worked well in predicting the cooling infrastructure power use at various BP fractions. While existing studies are either on hypothetical data centers or experimental setups, there is no considerable work on the feasibility of the method in real and operational data center. Economic requirements of the method is another aspect missing in the literature. This study includes assessments on the feasibility of the CRAH BP methods (forced and induced) in an operational data center using reduced-order modeling approaches suggested in the literature. As a result of the energy and economic analysis of various scenarios, it has been concluded that the feasibility of the CRAH BP method is directly related to the number of fans required by the design and recommendations for application have been proposed.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *erdenh@itu.edu.tr, f2219016@std.yildiz.edu.tr / Tel: +90 212 285 6648

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel enerji sarfiyatının ve karbon salınımının en az üçte biri binalardan kaynaklanmaktadır [1]. Binaların bu gibi olumsuz etkilerinin tespit ve azaltılmasına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır [2-4]. Veri merkezi sektörü ise küresel elektrik sarfiyatının yüzde 1'inden sorumludur [5]. Ancak sektördeki büyüme, enerji verimliliği konusundaki endişeleri de beraberinde getirmektedir. Veri merkezlerinde enerji verimliliği genellikle Güç Kullanım Etkenliği (Power Usage Effectiveness, PUE) olarak adlandırılan standartlaştırılmış Eş. 1'deki ölçüt ile ifade edilmektedir [6, 7]. Veri merkezinin toplam enerji sarfiyatının (P_D), bilgi teknolojileri teçhizatı (sunucu, depolama ve ağ teçhizatı gibi) enerji sarfiyatına (P_{IT}), oranıyla ifade edilen bu ölçütün değeri çok büyük ölçekli veri merkezlerinde 1,2'ye kadar düşebilirken, yerel sunucu odalarında 2,5'ten yüksek değerler alabilmektedir [8]. Veri merkezi enerji verimliliğini arttırmaya yönelik çabalar son yıllarda artmış olsa da en son raporlarda veri merkezlerinin yüzde 55'inden fazlasının 1,8'in üstünde PUE değerine sahip olduğu belirtilmektedir [8]. Bu nedenle hem kurulu kapasite hem de yeni veri merkezlerinin enerji verimliliğini arttırmaya yönelik önemli fırsatlar bulunmaktadır. Tipik bir veri merkezinde sunucuların harcadığı enerjinin yarısı kadar da soğutma için harcanır. Bu nedenle soğutma sisteminin verimliliği veri merkezinin verimliliğini doğrudan etkilemektedir [8].

$$PUE = \frac{P_D}{P_{IT}} \quad (1)$$

Tipik bir veri merkezinde sunucu kabinleri sıcak ve soğuk koridorlar oluşturacak şekilde yerleştirilirler [9]. Veri merkezlerinde odadan çıktıkları sıcak havayı bir soğutucu akışkan veya su soğutmalı eşanjörden geçirerek soğutan klimalara sırasıyla CRAC (computer room air conditioning) veya CRAH (computer room air handling) üniteleri denir. Bunların sağladığı soğuk hava, yükseltilmiş zemin altındaki plenumdan ve soğuk koridor zeminindeki menfezlerden geçerek soğuk koridora ve sunucu kabinlerinin ön yüzüne ulaşır. Odada bulunan bir miktar sıcak havayla da karışarak sunucular tarafından emilir. Sunucu kabinlerinin girişindeki hava sıcaklıklarında görülen düzensizlikler veri merkezinin işletme şartlarını belirlemektedir. Zira soğutma sistemlerinin veri merkezinde bulunan farklı sınıflardaki cihazların farklı işletme ortam gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir.

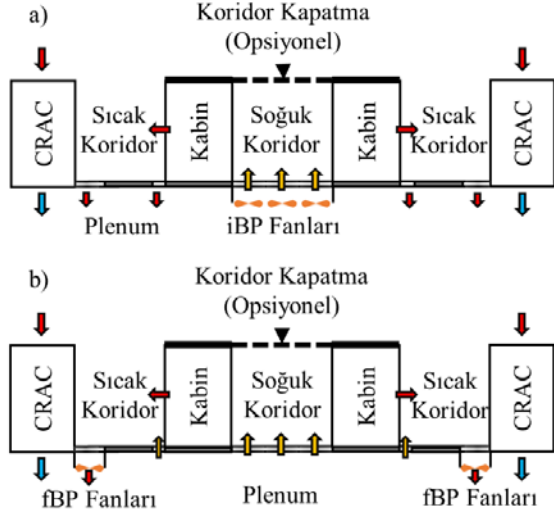
Sıcak oda havasının soğuk koridordaki havayla karışması neticesinde sunucu giriş sıcaklıklarının düzgün dağılım göstermemesi havayla soğutulan veri merkezlerindeki enerji verimsizliğinin en temel sebeplerinden birisidir. Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği [10], havayla soğutulan sunucu sistemleri için belli sıcaklık ve nem aralıklarını çalışma koşulu olarak tavsiye etmektedir. Buna göre herhangi bir sunucunun giriş sıcaklığının 27°C'yi aşmaması tavsiye edilir. Tipik açık koridorlu (AK) bir veri merkezinde klimalar en yüksek sıcaklıktaki sunucunun bu değeri aşmaması için diğer bütün sunucuları gereğinden

fazla soğutur. Koridor kapatmak geleneksel veri merkezi yerleşiminde sıcak koridor havasının soğuk koridordaki havayla karışmasını engeller ve genel olarak sunucu girişlerindeki hava sıcaklıklarının düzgün dağılım göstermesini sağlar. Bu sayede soğutma sistemleri tavsiye edilen sunucu giriş sıcaklıklarını aşmayacak şekilde daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılabilir. Diğer taraftan kapalı koridorlu (KK) veri merkezlerinde klimaların hem sunucunun ihtiyaç duyduğu ve hem de yükseltilmiş zeminden odaya gerçekleşen ve eski veri merkezlerinde klima akışının yarısına kadar oluşabilen sızıntıları karşılayacak miktarda hava beslemesi gerekir [11, 12]. Bu havanın da yüksek akış direncine sahip (~250 Pa) klimalardan geçerek klima fanları vasıtasıyla yükseltilmiş zemine gönderilmesi gerekir. Bu nedenle fan enerjisi veri merkezinin soğutma altyapısının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır [13].

KK veri merkezlerinin enerji verimliliğini arttırmak için önerilen klima baypas (BP) yönteminde, BP fanları sunucu hava ihtiyacının bir kısmını karşılarken klima fanları daha düşük hızlarda çalışır [14]. Menfezlerden soğuk koridora gönderilen havanın bir kısmı zeminde yer alan BP açıklıklarından gelen oda havasından oluşmaktadır. Bu açıklıklar bilinçli bir şekilde yerleştirilen BP menfezleri olabileceği gibi kablo geçişi için oluşturulan kanallar ve döşeme açıklıkları da olabilir. BP fanları oda ve plenum arasındaki basınç farkına karşı çalışır (~25 Pa). Bu da klima fanlarının maruz kaldığı dirence göre oldukça düşüktür. Fan kanunlarına göre fanın çektiği güç yaklaşık olarak hızın (ve dolayısıyla akışın) kübü ile doğru orantılı olduğu için fanlardan kaynaklanan enerji sarfiyatında dramatik bir düşüş gözlenir [14]. Diğer taraftan soğutma sistemi, sunuculara ulaşan hava sıcaklığının tavsiye edilen sıcaklık üst sınırını aşmaması için daha düşük sıcaklıklarda ve verimde çalışır. Bu durumda fan ve kompresör enerji sarfiyatı birbirinin tersi davranış sergileyen iki farklı eğilim gösteren bir optimizasyon problemi ortaya koymaktadır. Oluşturulan modellerle hava soğutmalı bir veri merkezi için optimum klima BP akışı bulunabilir.

Literatürde itişli (forced-fBP) ve çekişli (induced-iBP) olmak üzere iki farklı klima BP yöntemi üzerinde durulmaktadır (Şekil 1) [15]. iBP düzeninde klima akışı sunucu ihtiyacının altına indiğinde plenum basıncı oda basıncından daha düşük olduğu için normal şartlarda hava sızıntılarının yön değiştirmesine sebep olmaktadır. Diğer taraftan iBP fanlarının sunuculara gönderilen hava akışının tamamına, düşük plenum basıncı ve menfezlerin sebep olduğu basınç farkını yenecek basınç artışı sağlaması gerekir. fBP yönteminde ise plenum pozitif basınçta tutulurken sızıntılar devam edeceği için BP akışının bir kısmı sızıntı havasına karışacaktır. fBP yöntemi sıcak koridorda BP fanlarıyla entegre edilmiş menfezlere ihtiyaç duyar. Fanlar BP için gerekli havayı yaklaşık olarak menfezlerin sebep olacağı akış direncine karşı çalışarak (~25 Pa) plenuma gönderir. Erden vd. [15] tarafından yapılan çalışmada varılan ilk sonuçlara göre iBP, özellikle hava sızıntısını engellediği için yüzde olarak yaklaşık 5 puan daha

fazla enerji tasarrufu sağlamıştır. Diğer taraftan ortalama seviyede sızıntıya sahip bir veri merkezinde fBP yöntemi nispeten daha az miktarda akış yönlendireceği için daha az miktarda BP fanına ihtiyaç duyulması beklenebilir. Bu nedenle problem hem enerji hem de ekonomik açıdan optimizasyonu gerektirmektedir.



Şekil 1. (a) iBP ve (b) fBP klima BP yöntemlerinin şematik gösterimleri [24]
(Schematics of (a) iBP and (b) fBP CRAH BP methods [24])

Klima BP yönteminin özellikle KK veri merkezlerindeki enerji optimizasyonuna yönelik literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Demetriou ve Khalifa [16] itişli klima BP düzeni için belli bir tasarım noktasını baz alarak bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Sonuç olarak KK veri merkezleri için %60'a varan enerji tasarruflarının mümkün olduğu belirtilmiştir. Plenum, oda ve kapalı koridor gibi kritik hacimlerdeki basınç dağılımı ve sunucu, klima ve BP fanlarının performansları için akış modellemesine ihtiyaç duyulmaktadır. Akış ağı modelleri (FNM) ile veri merkezlerinde oda seviyesinde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. FNM farklı tasarımları hızlı bir şekilde test edip en iyi çalışma şartlarını elde etmeyi sağlayan etkili bir indirgenmiş modelleme yaklaşımı sunar. Bahsekonu sistem için de FNM belirli sistem akış dirençlerine karşılık sistemi oluşturan fanların çalışma koşullarını tahmin etmeye yardımcı olur. Veri merkezlerinde oda seviyesinde FNM kullanımına dair örnekler bulunmaktadır. Kang vd. [17] FNM sonuçlarını hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) sonuçlarıyla karşılaştırarak FNM tahminlerinin özellikle daha fazla direnç oluşturan menfezlere sahip veri merkezlerinde daha güvenilir olduğunu ifade etmişlerdir. Schmidt vd. [18] bir başka çalışmada CFD kullanarak bu sonucu detaylandırmış, menfezleri %20'den fazla açıklığa sahip ve plenum derinliği 18 inçin altında (45,7 cm) olan veri merkezlerinde düzgün basınç dağılımının (dolayısıyla menfez akışlarının) elde edilemediğini belirtmişlerdir. Nispeten temiz ve derin plenumlar için FNM hava debisi ve fan gücü tahminlerinin deneysel verilerle karşılaştırıldığında makul seviyede oldukları görülmektedir [19]. Zira Erden vd.

[19, 20] FNM'yi oluşturacak temel bileşenlerin model karakteristiklerini elde etmiş, KK veri merkezini temsil eden bir ortam için modeli deneysel olarak teyit etmişlerdir. FNM'ye göre akış ve fan gücü tahminlerinde deneysel verilere göre %10'un altında hata görülmüştür [20].

Erden vd. [15] soğutma sistem bileşenlerinin gücünü tahmin edebilmek için termodinamik modeller (TDM) oluşturmuş, bu modellerde de FNM'den elde edilen sonuçları (akış ve fan gücü) kullanmışlardır. Erden vd. [15] çalışmalarında FNM bileşenleri için AFT Fathom yazılımını, soğutma altyapısı bileşenlerinin termodinamik analizi için TRNSYS adlı yazılımı kullanmıştır. Erden vd. [15] tarafından kullanılan iki aşamalı Fathom ve TRNSYS modelleri Erden vd. [21] tarafından bazı klima BP çalışma şartlarını kapsayacak şekilde birleşik modelleme ve optimizasyon aracı haline getirilmiştir.

Klima BP yönteminin enerji optimizasyonuna yönelik oluşturulan indirgenmiş modellerde farklı hacimlerde mükemmel karışım varsayımı uygulanmakta ve özellikle kapalı koridor nedeniyle oda havasıyla menfezlerden gelen hava karışmayacağı için sunucu giriş sıcaklıklarının düzgün dağılım göstereceği düşünülmektedir. Ancak bu durum BP yöntemi gibi farklı sıcaklıklarda hava akışlarının karıştığı bir uygulama için teyit edilmeye muhtaç bir varsayımdır. Demetriou ve Khalifa [16] da nitel olarak KK veri merkezleri için BP açıklıklarının menfezlere uzaklığı arttıkça odadan gelen sıcak havayla klimalardan gelen soğuk havanın daha iyi karışmasının sağlanabileceğini tespit etmişlerdir. Erden vd. [20] KK düzeninde deneysel olarak BP akış miktarının artışıyla kabin giriş sıcaklıklarının dağılımında artan bir düzensizlik olduğunu tek bir çalışma şartında ortaya koymuştur.

Klima BP yöntemi için literatürde ağırlıklı uygulama alanı olarak KK veri merkezleri üzerinde durulmuştur. Enerji tasarrufunun önemli bir kısmının akışın klimalardan daha düşük dirençli BP açıklıklarına yönlendirilmesinden ve çekişli BP uygulamasında da BP akışı arttıkça plenumdan odaya hava sızıntısının azalmasından kaynaklandığı görülmektedir [19]. Bu davranışlardan yola çıkarak AK veri merkezlerinde de klima BP uygulaması enerji tasarrufu sağlama potansiyeline sahiptir. Ancak bunu mükemmel karışım varsayımıyla yürütülen modellerle teyit edebilmek mümkün değildir. Bu nedenle yöntemin oluşturduğu sıcaklık ve akış dağılımlarıyla ilgili daha detaylı bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Sunucu giriş sıcaklıklarının farklı yerleşim planları, KK ve AK veri merkezleri veya farklı BP açıklık konumları için tavsiye edilen sınırlar içerisinde kalacağını tahmin edebilmek için CFD gibi gelişmiş modelleme araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Veri merkezlerinde CFD modelleme çalışmaları son 20 yılda yaygınlaşmıştır. Patankar CFD modelleriyle plenum derinliği, menfez geçişliliği gibi birçok fiziksel parametrenin etkileri üzerine çalışmıştır [9]. Buna benzer oda seviyesinde yapılmış çalışmalar olsa da menfez altı fanlarının etkisi üzerine az sayıda çalışma mevcuttur. Athavale vd. [22] deneysel bir veri merkezinden elde ettiği sonuçlarla teyit edilmiş bir CFD

modeli geliştirerek altında fan bulunan aktif menfezlerin plenum basıncı ve sızıntı akışına etkisi olduğunu tespit etmiştir. Ancak aktif menfezlerin klima BP yöntemini uygulamak amacıyla kullanılması ve bu durumdaki sıcaklık dağılımları ilk olarak Erden [23] ve Ahmadi ve Erden [24] tarafından herhangi bir deneysel çalışma olmaksızın değerlendirilmiştir. Bu çalışmalarda KK modeli için bazı durumlarda indirgenmiş model yaklaşımının hatalı sonuçlar verebileceği sonucuna varılmıştır [23, 24]. Klima BP yöntemine dair, deneysel çalışmalarla [20] desteklenen ilk CFD analizi Ahmadi ve Erden [25] tarafından yapılmıştır. Geliştirilen CFD modelleri klima BP enerji optimizasyonunun temelini oluşturan mükemmel karışım varsayımının nicel anlamda hangi şartlarda ne kadar tutarlı olduğunu tespit etmiş, KK ve AK düzenlerinde sunucu giriş sıcaklıklarının nasıl değişkenlik gösterdiğini anlayabilmek için gerekli veriyi sağlamıştır [25]. Bu veriler ışığında bu çalışmada değerlendirilene benzer plenum derinliğine ve yük yoğunluğuna sahip veri merkezinde indirgenmiş modellerin kabul edilebilir hatayla kullanılabileceği ön görülmüştür.

Şekil 1'de görülen karakteristik özelliklere sahip geleneksel bir veri merkezi için klima BP uygulamalarının ekonomik olarak ne kadar uygun olacağı sadece enerji tasarruflarına değil, bu uygulamalar için gerekli teçhizat ve altyapının toplam maliyet analizine dayanır. Literatürde klima BP yönteminin önemli enerji tasarruf potansiyelinin olduğunun altı çizilse de yatırımın ekonomik analizine yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Zira gerek itişli ve gerekse de çekişli BP yönteminin yeni veya eski veri merkezlerine uygulanabilmesi için ilk yatırım maliyetlerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Bu çalışmada işletme halindeki bir veri merkezi için BP yöntemlerinin çeşitli varyasyonları üzerine yapılan maliyet araştırmaları ve enerji analizleri, uygulamanın fizibilitesine yönelik değerlendirmeler yer almaktadır.

2. YÖNTEM (METHOD)

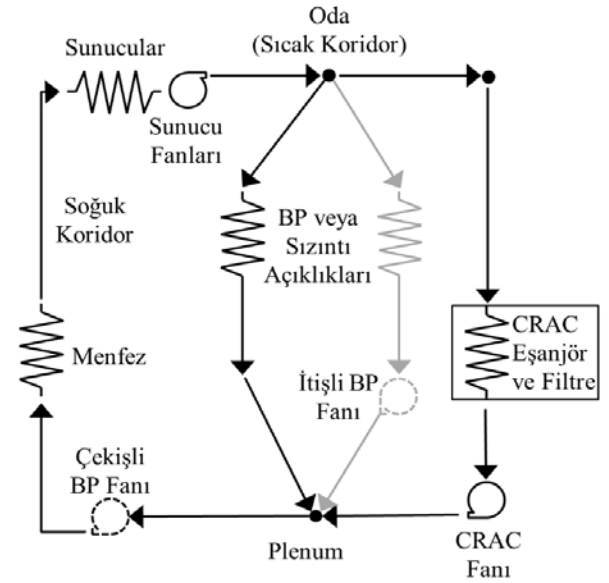
2.1. Akış Ağı ve Soğutma Altyapısı için Termodinamik Modelleme

(Flow Network and Thermodynamic Modeling for the Cooling Infrastructure)

Şekil 2, temel olarak iki aşamalı modelleme yaklaşımının şematik görüntüsünü vermektedir. Bu yaklaşımın ilk adımında akış ağı modeli (FNM), veri merkezinin başlıca hava akış hatlarından, bu hatlarda direnç oluşturan bileşenlerden ve fanlardan oluşmaktadır. Gri renkle işaretlenen hat üzerindeki itişli BP (fBP) fanına ilişkin hat devredeyken çekişli BP (iBP) fanı devre dışı kalmaktadır. iBP fanı devredeyken ise gri hat devre dışı kalmaktadır. Temel olarak kayıp katsayısı K ile karakterize edilen her direnç, ilgili akış hattında Eş. 2'deki basınç düşüşüne sebep olur. Burada ρ havanın yoğunluğu, V ise ilgili direnç için belirlenen akış alanından geçen havanın hızıdır.

$$\Delta P = K \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2)$$

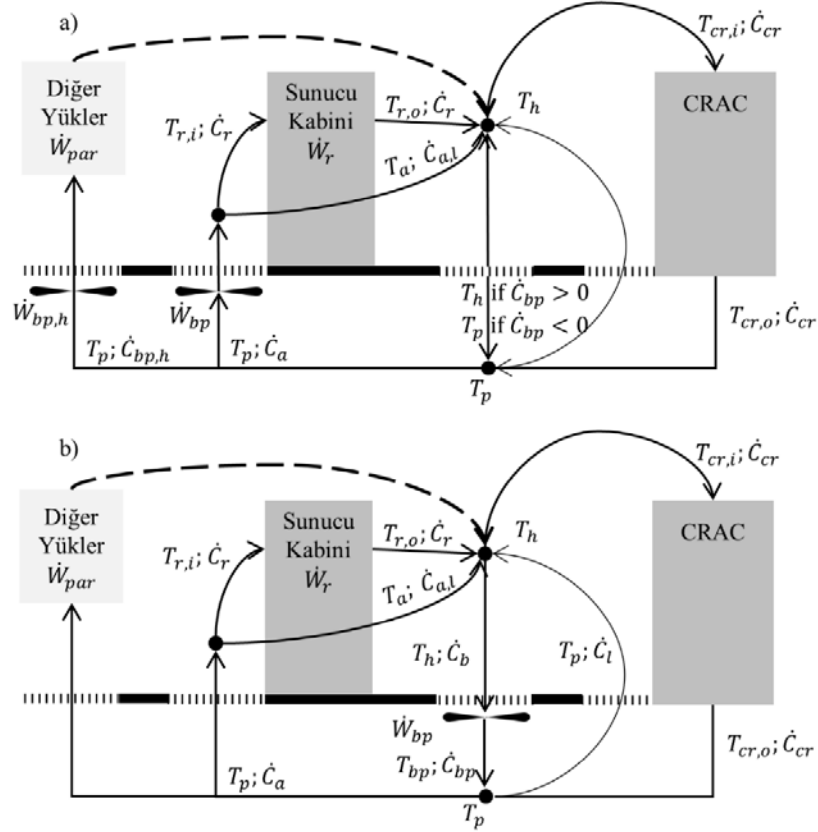
Şekil 2'de oda seviyesi olarak tanımlanan noktada atmosferik basınç varsayımı uygulanır. Denklem 2 yardımıyla kayıp katsayıları yardımıyla her bileşenin sebep olduğu basınç düşüşleri hesaplanır. iBP için BP fan sayısının soğuk koridordaki menfez sayısından daha düşük olduğu durumlarda fan ile menfez arasında akış alanının genişlediği bir senaryo söz konusudur. Bu durumlarda menfez direncine ek bir direnç olan K_b^* oluşmakta ve Erden vd.'nin [20] çalışmasında olduğu gibi bu değer ASHRAE Fundamentals el kitabının kanal tasarımı bölümündeki ilgili başlık yardımıyla tahmin edilmektedir [26]. Bu ilave kayıp katsayısı, ilk yatırım maliyetini düşürmek üzere fan sayısını azaltmanın fanın yenmek zorunda olduğu basınçta bir miktar artışa sebep olacağını göstermektedir. Ancak bu artışın sonuçlarda ciddi bir artışa sebep olmadığı görülmüştür.



Şekil 2. Modelleme yaklaşımının şematik gösterimi
(The schematic representation of the modeling approach)

Yukarıda bahsedilen direnç tanımlamalarının yanı sıra Erden vd.'nin [20] deneysel çalışmalarla teyit ettiği ve sonraki optimizasyon çalışmalarında kullandığı [21], klima ve BP fanlarına ait basınç ve verim eğrileri temsili olarak bu çalışma kapsamında da kullanılmıştır. Kalibre edilen FNM modeliyle çeşitli senaryolara dair akış, basınç ve fan gücü değerlerinin çözümlenmesi yapılabilmektedir. Sıcaklık dağılımlarına ilişkin diğer indirgenmiş modellerde olduğu gibi oda ve plenum hacimleri için enerji denklemlerinin çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Veri merkezi sunucu yüklerinin soğuk koridorda birleştirilmesi, soğuk koridor kapatma uygulaması ve sunucu giriş sıcaklığı için belli bir $T_{r,i}$ değerinin varsayılması halinde basitleştirilmiş hava ve ısı akış diyagramı Şekil 3'teki gibi oluşturulabilir.

Bu bilgiler ışığında oda ve plenum için elde edilen enerji denklemlerinin çözümleri aşağıdaki gibidir. Burada sıcak koridor sıcaklığı T_h aynı zamanda klima giriş sıcaklığını da temsil etmekte ve farklı tasarım ve çalışma şartlarında Eş. 3'teki gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 3. (a) iBP ve (b) fBP modellerinin temsili hava ve ısı akış diyagramları
(Representative air and heat flow diagrams of (a) iBP and (b) fBP models)

$$T_h = \begin{cases} \frac{\dot{W}_{par} + \dot{C}_r T_{r,o} + \dot{C}_l T_p + \dot{C}_{a,l} T_{r,i} + \dot{C}_{bp,h} T_p + \dot{W}_{bp,h}}{\dot{C}_{cr}} & \dot{C}_{bp} = -\dot{C}_l < 0 \\ \frac{\dot{W}_{par} + \dot{C}_r T_{r,o} + \dot{C}_{a,l} T_{r,i} + \dot{C}_{bp,h} T_p + \dot{W}_{bp,h}}{\dot{C}_{cr} + \dot{C}_{bp}} & \dot{C}_{bp} = -\dot{C}_l > 0 \end{cases}$$

$$T_h = \frac{\dot{W}_{par} + \dot{C}_r T_{r,o} + \dot{C}_l T_p + \dot{C}_{a,l} T_{r,i}}{\dot{C}_{cr} + \dot{C}_{bp}}$$

(3)

Burada \dot{W}_{par} odada sunucu dışındaki elektriksel yükleri ifade etmekte olup Turkmen vd. [27] tarafından yapılan deneysel çalışmada 10,55 kW olarak belirlenmiştir. \dot{C}_r , $\dot{C}_{a,l}$ ve \dot{C}_{cr} sırasıyla sunucular, soğuk koridora gelen ve sunucu ihtiyacından bir miktar fazla olan havadan odaya gerçekleşen sızıntı ve klimalara ait hava akışlarının ısı kapasitelerini ifade eder. \dot{C}_l genel olarak yükseltilmiş zeminden odaya gerçekleşen sızıntı akışına ait ısı kapasiteyi verir. Sıcak koridordaki serbest açıklıklarda gerçekleşen bu akışın debisi iBP yönteminde BP fanlarının devreye girmesiyle azalış gösterir ve plenum basıncının negatif olmasıyla tersine

döner. Bu nedenle iBP yönteminde BP fanlarının oluşturduğu çekiş nedeniyle ters istikamette oluşan akış $\dot{C}_{bp} = -\dot{C}_l$ olarak tanımlanır. iBP yönteminde soğuk koridor dışındaki elektriksel teçhizata yönelik ihtiyaç olması halinde kullanılan aktif menfezlerdeki akışın ısı kapasitesi $\dot{C}_{bp,h}$ ile ifade edilirken bu bölgelerde konumlandırılan BP fanlarının gücü $\dot{W}_{bp,h}$ ile ifade edilir. T_p plenum sıcaklıklarını temsil ederken $T_{r,o}$, sunucu çıkışındaki hava sıcaklığını verir ve $T_{r,i}$, sunucu akışı ısı kapasitesi \dot{C}_r ve sunucu elektriksel yükü \dot{W}_r yardımıyla Eş. 4 ile hesaplanır.

$$T_{r,o} = T_{r,i} + \frac{\dot{W}_r}{\dot{C}_r}$$

(4)

Turkmen vd. [27] tarafından yayınlanan çalışmada yapılan ölçümlere bağlı olarak \dot{W}_r ve \dot{C}_r 'nin sırasıyla 86 kW ve 10,45 kW/K değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Plenum enerji denkleminin çözümlenmesiyle elde edilen klima çıkış sıcaklıkları $T_{c,o}$ Eş. 5 ile ifade edilir.

Burada da \dot{W}_{bp} , iBP senaryolarında soğuk koridor altına yerleştirilen BP fanlarının, fBP senaryosunda ise sıcak koridordaki BP fanlarının güçlerini verir. Kabin giriş sıcaklığı $T_{r,i}$ ASHRAE tarafından önerilen 18-27°C aralığında olacak şekilde sabit 22°C kabul edilmiştir [10].

Yukarıdaki denklemler kullanılarak elde edilen sıcaklıklar T_h ve $T_{cr,o}$ sırasıyla klima giriş ve çıkışındaki hava sıcaklıklarını verir. Klima çıkış sıcaklığına göre klimanın COP değerini hesaplamak için Moore vd. [28] tarafından önerilen Eş. 6 kullanılır.

$$iBP \Rightarrow T_{cr,o} = \begin{cases} \dot{C}_{bp} = -\dot{C}_l < 0; & T_{r,i} - \frac{\dot{W}_{bp}}{\dot{C}_a} = T_p \\ \dot{C}_{bp} = -\dot{C}_l > 0; & \frac{(\dot{C}_a + \dot{C}_{bp,h})T_p + \dot{C}_l T_h}{\dot{C}_{cr}} \end{cases} \quad (5)$$

$$fBP \Rightarrow T_{cr,o} = \frac{(\dot{C}_l + \dot{C}_a)T_p - \dot{C}_{bp}T_h - \dot{W}_{bp}}{\dot{C}_{cr}}$$

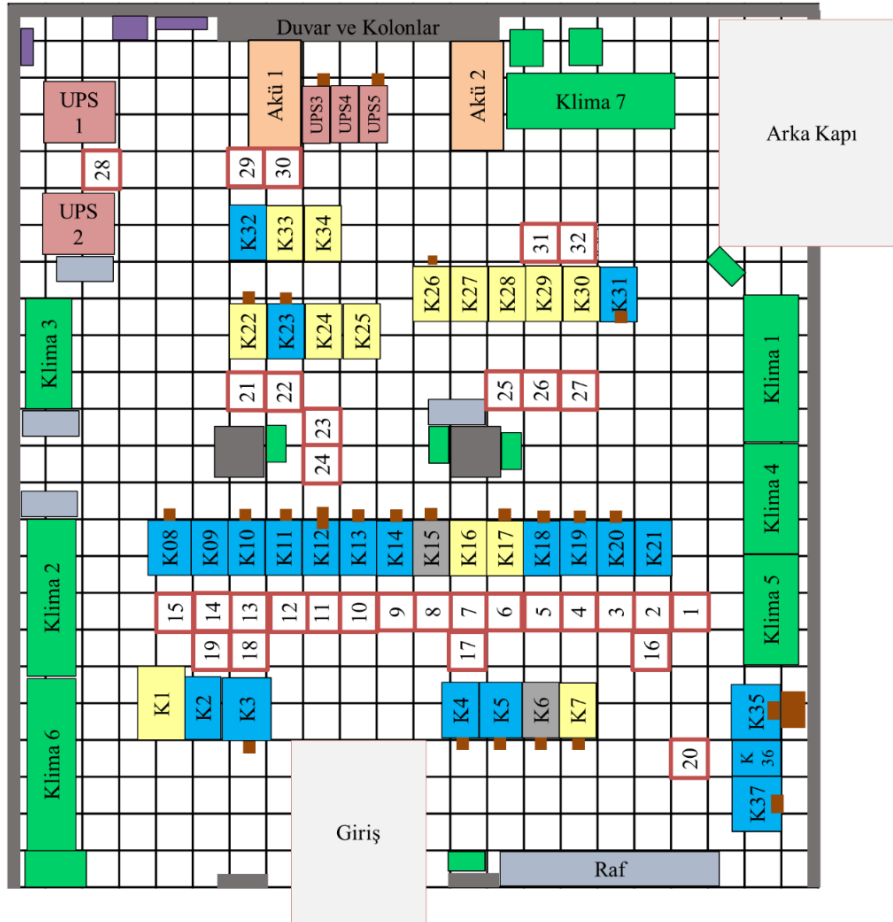
$$COP = 0,0068T_{cr,o}^2 + 0,0008T_{cr,o} + 0,458 \quad (6)$$

CRAC giriş-çıkış sıcaklıkları ve klima akışı kullanılarak hesaplanan soğutma yükü \dot{Q}_c ve COP değeri kullanılarak CRAC kompresör gücü \dot{W}_{cr} hesaplanabilir. Toplam soğutma altyapı gücü \dot{W}_c , CRAC kompresör gücü \dot{W}_{cr} , CRAC fan gücü $\dot{W}_{cr,f}$ ve BP fan güçlerinin \dot{W}_{bp} toplamı olarak hesaplanır.

2.2. Pilot Veri Merkezi (Pilot Data Center)

Bu çalışmada yer alan veri merkezinin özellikleri ve altyapısıyla ilgili detaylar Turkmen vd. [27] tarafından paylaşılmıştır. Veri merkezi 180 m² alana kurulu, hava soğutmalı, küçük ölçekli bir veri merkezidir. Şekil 4'te bahse konu yerleşim planı verilen veri merkezinin yükseltilmiş zemin üzerindeki karolarının her biri 24x24 inç² (~61x61 cm²) boyutlarındadır. Veri merkezinin içerisinde 37 adet kabin, 7 adet klima, 5 adet kesintisiz güç kaynağı (UPS), 2 adet akü, 5 adet küçük klima, 4 adet dolap ve zeminde karo boyutlarında 32 adet menfez bulunmaktadır. Şekilde aktif ve dolu kabinler mavi renkle belirtilirken, kabinlerden açık sarı renkli olanlar ya boş ya da içindeki cihazları çalışmayan kabinleri temsil etmektedir. Gri renkli olanlar da yarısı kadar çalışan cihaz içermektedir. Kırmızı çerçeveli numaralandırılmış kareler yükseltilmiş zemindeki menfezleri temsil etmektedir. Genellikle kabin arkasında kablo geçişleri için kullanılan sızıntı açıklıkları da kahverengi renkli küçük dikdörtgenler yardımıyla belirtilmiştir.

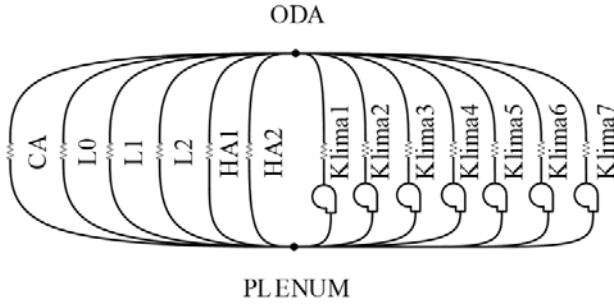
Veri merkezinde 7 adet hassas klima (CRAC (Computer Room Air Conditioners)), 5 adet devre dışı küçük oda tipi klima bulunmaktadır. Hassas klimaların marka ve



Şekil 4. Veri merkezi yerleşim planı [27] (Data center floor layout [27])

modellerinin yanında klimaların katalog debileri, fan gücü ve fan sayısı değerleri gibi klima detayları Tablo 1’de verilmiştir.

Veri merkezinin FNM çözümlemesi için AFT Fathom yazılımı kullanılmıştır. Literatürdeki örnekler [19][21] ve veri merkeziyle ilgili daha önce yapılan deneysel çalışmadan [20] edinilen bilgiler ışığında, veri merkezindeki akış hatları ve direnç oluşturan bileşenler tanımlanmıştır. CRAC fanları ve BP fanlarına ilişkin diğer örneklerdeki fan ve verim eğrileri kullanılmıştır [21]. Şekil 5’te veri merkezinin oda ve plenum arasında oluşturulan temsili akış hatları yer almaktadır. Bu hatlar Turkmen vd. [27] tarafından önerilen iyileştirme çalışmaları neticesinde sıcak koridorda yer alıp devre dışı bırakılması tavsiye edilen menfezleri (HA1), kablo geçiş bölgelerindeki açıklıkları (L0), zemine yayılmış sızıntının önlenebileceği (L1) ve önlenemeyeceği tahmin edilen kısımları (L2), soğuk koridor menfezlerini (CA) ve sıcak koridorda olsa da soğutma ihtiyacı olan elektriksel teçhizat için bulundurulmuş menfezleri (HA2) içerir.



Şekil 5. Turkmen vd. [27] tarafından çalışılan pilot veri merkezi için varsayılan akış hatları
(Assumed flow paths for the pilot data center model studied by Turkmen et al. [27])

Her bir hat için kayıp katsayıları, ölçülen veya ölçümlerle hesaplanan akış değerleri ve ölçülen ortalama plenum basıncı (26 Pa) kullanılarak elde edilmiştir [27]. CA hattı kayıp katsayısı hesabı için yerleşim planında görülen 1-20 numaralı menfezlerin akışları, HA1 için sıcak koridorda yer

alan 21-27 ve 31-32 numaralı menfezlerin akışları, HA2 için UPS etrafında yer alan 28-29-30 numaralı menfezlerin akışları, L0 için planda kabinlerin arkasında yer alan kahverengi dikdörtgen kesitlerde görülen kablo geçişi sızıntı akışları, L1 için doğrulanmış CFD modelinde [27] azaltılan zemin sızıntı akışı ve L2 için de toplam akıştan diğer akışları çıkararak elde edilen sızıntı akışı kullanılmıştır. Turkmen vd. [27] tarafından tanımlanan veri merkezi başlangıç (baseline-BL) modelinde veri merkezi oda-plenum akış hatlarının konumları, geçen akış ve hesaplanan direnç değerleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Klimalar ve akış hatları modelleri ile pilot veri merkezi için iBP ve fBP uygulamasına geçmeden önce varsayımsal başlangıç modelleri elde edilmiştir. Bu modellerde Turkmen vd. [27] tarafından çalışılan senaryoya belli başlı iyileştirmelerin uygulanacağı varsayımı kullanılmıştır. Bu iyileştirmelerin en başında Turkmen vd. [27] tarafından da önerildiği gibi sunucu kabinlerinin tamamının CA hattında yer alan ana soğuk koridora yerleştirilmesi, bu koridorda akışı sağlamak için menfez sayısının 28’e çıkartılması ve koridorun fazla havanın sızıntıyla tekrar odaya karışmasına izin verecek şekilde kapalı koridor haline getirilmesi bulunmaktadır. Diğer başlangıç modellerinde ise sırasıyla L0 ve L1 hatlarının devre dışı bırakılması değerlendirilmektedir. Bütün modellerde iBP fanları soğuk koridor menfezlerinin altına yerleştirilirken (CA), fBP fanları sıcak koridorda HA1 ile aynı akış direncine sahip ve önerilen fanlara uygun sayıda menfezin altına yerleştirilirler. Yukarıda tarif edildiği gibi kademeli olarak veri merkezinde yer alan sızıntıların kapatılması ile elde edilen üç farklı BL senaryosu aşağıdaki gibi özetlenebilir. BL1 senaryosuna ilişkin temsili yerleşim planı Şekil 6’da verilmiştir.

- Sunucular CA’da, CA menfez sayısı 28, HA1 kapalı (BL 1) (Şekil 6),
- BL1 + L0 kapalı (BL 2)
- BL2 + L1 kapalı (BL 3)

Pilot veri merkezindeki klimalar sabit fan hızında çalışmaktadır. Bu kapsamda ilk senaryo olarak fan hızlarının ayarlanması için mevcut teçhizata değişken hızlı sürücülerin

Tablo 1. Mevcut klima özellikleri (Specifications of the available CRAC units)

CRAC Marka / Model	Akış Debisi (m ³ /h)	Fan Gücü (kW)	Fan Sayısı
1,2 Liebert / L 83 UA	20020	6,2	2
3,4,5 Emerson / M 58 UA	12910	3,8	2
6,7 Stulz / CSU1052A	24000	8,5	2

Tablo 2. Akış hatlarının kayıp katsayıları (Loss coefficients of flow paths)

FNM Bileşenleri	Akış yerleri	Akış (kg/s)	K Değeri
CA	Menfez 1-20	10,054	29,5
HA1	Menfez 21-27,31,32	5,606	26,3
HA2	Menfez 28-30	1,346	41,0
L0	Kablo geçişi	7,494	1,61
L1	Zemindeki önlenemez sızıntı alanı	5,422	2617
L2	Kalan sızıntı	12,914	2617

(Variable Speed Drive (VSD)) entegre edilmesi üzerinde durulmuştur. Bu senaryolarda klima BP yöntemi kapsamında klimaların nominal akışın %40'ına kadar düşük akışlarda çalışması değerlendirilmiştir. Pilot veri merkezinde olduğu gibi eski tip ve özellikle soğutucu akışkan devreli klima ünitelerinin değişken hızlı hale getirilmesinin cihazın çalışma kararlılığına olumsuz etkisi olabileceği düşüncesi firma yetkilileriyle yapılan mülakatlarda belirtilmiştir [29]. Bu nedenle VSD yatırımına ihtiyaç duymayacak bir başka yaklaşım, klimaların kademeli olarak kapatılmasıdır. Mevcut altyapının daha az maliyetle klima BP yöntemine yönelik kullanılmasını sağlayacak bu senaryolarda kapatılan klimaların sağladığı akış değerleri toplamı azalacak şekilde kademeli olarak aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir.

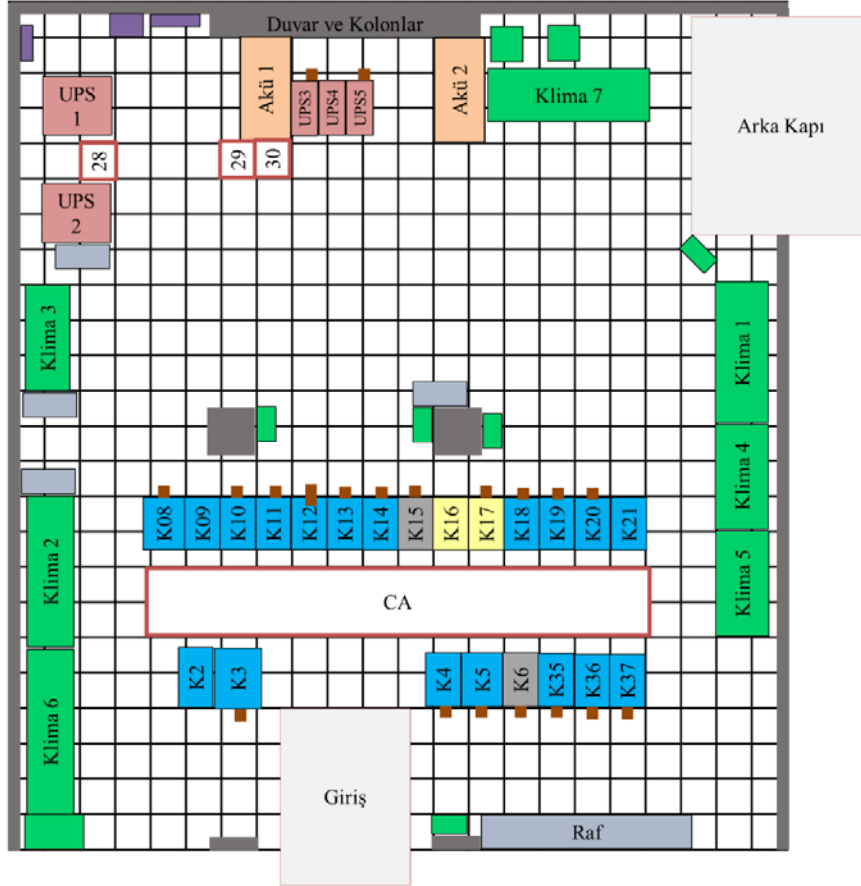
- Klima 3 kapalı
- Klima 3-4 kapalı
- Klima 3-7 kapalı
- Klima 3-4-7 kapalı

- Klima 3-1-7 kapalı
- Klima 3-1-4-7 kapalı
- Klima 3-1-4-5-7 kapalı
- Klima 3-1-4-5-7-6 kapalı

Klima fan hızlarının değiştirildiği ve klimaların devre dışı bırakıldığı bu iki temel senaryoyla birlikte BP fan sayılarının değiştirilmesinin etkisi incelenmiştir. Üzerinde durulan senaryolar Tablo 3'te özetlenmiştir.

2.2.1. BP modellerinin tasarım detayları (Design details of the BP models)

Pilot veri merkezinde klima BP uygulanmadan önce dağınık olarak yer alan iş yüküne sahip kabinlerin tek soğuk koridorda toplanması ve kabinlerin akış ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla da soğuk koridora 28 menfez yerleştirilmesi uygun görülmüştür (Şekil 6).



Şekil 6. BL1 senaryosundaki tahmini yerleşim planı (Estimated floor layout of the BL1 scenario)

Tablo 3. Pilot veri merkezi senaryolarının özeti (Summary of the pilot data center scenarios)

Baseline Durumlar	Senaryolar	Yöntem	BP Fan Sayısı	CRAC Fan Hızı
BL1, BL2, BL3	Klima Kapatma	iBP	28-14-10-8	%100
		fBP	9-7	
	VSD	iBP	28-14-10-8	%90-%40
		fBP	9-7	

iBP senaryosunda soğuk koridora yerleştirilmesi ön görülen 28 adet menfezde 28 (1,00 fan/menfez), 14 (0,50 fan/menfez), 10 (0,33 fan/menfez) ve 8 (0,25 fan/menfez) adet BP fanı olacak şekilde klima BP yönteminin performans değerlendirmesi yapılmıştır. BP fanları menfezin altına yerleştirilir ve akışta kayıplar olmaması için menfez ile BP fanı arasında bir kanal yapılması gerekir. Kanal tasarımı yapılırken menfez başına bir adet fan kullanılması halinde sabit kesitli bir kanal ürünüyle birlikte tedarik edilebilir. Ancak iBP senaryolarında olduğu gibi menfez sayısından daha az sayıda fan kullanılması halinde fandan menfeze ulaşana kadar genişleyen kesitli bir kanal tasarımına ihtiyaç duyulur. Bu geçiş kanalının oluşturduğu basınç kaybı katsayısıyla karakterize edilebilir. Kayıp katsayıları ASHRAE kanal tasarım ilkelerine göre hesaplanmıştır [26]. Hesaplanan değerler 14, 10 ve 8 BP fanlı üç senaryo için sırasıyla 1,52, 6,22 ve 10,79 olarak menfez dirençlerine eklenmiştir. Oda akışının sıcak koridordaki menfezlerin altına konumlandırılan fanlarla plenuma yönlendirilmesi fBP yöntemi kapsamında sağlanır. Bu kapsamda sıcak koridora yerleştirilmesi ön görülen 9 adet menfezin her birine 1 adet BP fanı yerleştirilmesi ve 7 adet klimanın her birinin önüne 1 adet menfez ve BP fanı yerleştirilmesi olmak üzere iki farklı BP fan sayısının değerlendirildiği alt senaryo bulunmaktadır.

2.2.2. CRAC modellerinin kalibre edilmesi (Calibration of the CRAC models)

Hazırlık aşamasında CRAC modellerinin katalog verisinde belirtilen tasarım çalışma şartlarında teyit edildiği bir kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Kalibrasyon süreci iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda Tablo 1’de listelenen tüm klima modelleri için dış basınç değeri (external pressure) 20 Pa olarak kataloglardan elde edilmiştir. 20 Pa plenum basıncında katalogdaki akış ve fan gücü değerleri kullanılarak CRAC bileşenleri için elde edilen kayıp katsayıları (Tablo 1) ve Erden vd. [20] tarafından deneysel olarak teyit edilip bu çalışmada da kullanılan fan eğrisi üzerindeki fan hızı değerleri elde edilmiştir. İkinci adımda ise birinci adımda katalog hedefleriyle elde edilen fan hızları sabit tutularak Turkmen vd. [27] tarafından ölçülen 26 Pa plenum basıncında yine Turkmen vd. [27] tarafından ölçülen akış değerlerini veren kayıp katsayıları elde edilmiştir. Bu adımda tasarımdaki fiziksel farklılıklardan dolayı gerçekte klimanın katalog veya diğer klimalardan farklılık gösterebileceği varsayımı kullanılmıştır. Klimalar için ölçüm yapılan akış ve basıncı mevcut fan eğrisiyle sağlayan fan hızı, CRAC bileşenlerinin kayıp katsayıları ve ilgili çalışma şartlarına karşılık gelen tahmini fan gücü değerleri Tablo 4’te verilmiştir.

2.3. Ekonomik Analiz (Economic Analysis)

Ekonomik analiz kapsamında toplam sahip olma analizine yönelik indirgenmiş nakit akışları kullanılarak net bugünkü değer, iç kârlılık (verim) oranı, indirgenmiş geri ödeme süresi gibi ölçütler kullanılmıştır [30]. Bir yatırımın net bugünkü değeri (NBD), yatırımın ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı nakit girişinin önceden saptanmış belirli bir indirmeye (iskonto) oranı üzerinden bugüne indirgenmiş değerleri toplamı ile yatırımın gerektirdiği nakit çıkışının bu belirli indirmeye oranı üzerinden bugünkü değeri toplamı arasındaki farktır. Buna göre bir yatırımın kabul edilebilir olması için NBD pozitif olması gerekmektedir.

Yatırımın iç kârlılık oranı (İKO), yatırımın gerektireceği nakit çıkışı ile ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı nakit girişini eşit kılan indirmeye (iskonto) oranı olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle yatırımın “net bugünkü değerini” sıfıra eşitleyen indirmeye oranına İKO adı verilmektedir. İKO, yeniden yatırım hesaplamalarında sürekli artan bir oran kullanmak suretiyle yanıltıcı sonuçlar alınmasına sebep olabilmektedir. Bunun yerine, yeniden yatırım hesaplamalarında sabit bir oran kullanan değiştirilmiş İKO (DİKO) kullanılarak daha sağlıklı sonuçlar elde edilmektedir [31]. Yatırımın kârlılık 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 [32]. Başka bir deyişle yatırımın kendini amorti etmesi için geçen süre olarak adlandırılabilir. Hesaplamalarda paranın zaman değeri ve nakit akışları dikkate alınmaktadır.

Klima BP yöntemi uygulamasında mevcut sistemin üzerine eklenmesi gereken tek donanım BP fanlarıdır. Bu amaçla kullanılmasa da bu amaca hitap edebilecek fan destekli menfez sistemleri bulunmaktadır. Bu ürünlere ilişkin fan fiyatları birim başına 950-3200 ABD doları arasında değişmektedir [33]. Ülkemizde temsilcilikleri olan firmalardan klima BP yöntemi kapsamında değerlendirilebilecek iki ayrı ürünle ilgili alınan fiyatlar ise birim başına 2380 avro [34] ve 4000 ABD dolarıdır [35]. Yıllık bakım maliyeti olarak da birim başına 200 TL ön görülmektedir [34]. Fan değişimine dair sırasıyla ilgili firmalardan edinilen bilgiye göre rulman ömrü 40°C çalışma şartlarında 40000 saat (~5 yıl) ve 35°C’de 7 yıldır. Çalışma sıcaklığının daha düşük olması rulman ömrünü uzatacaktır. Önerilen yöntemdeki çalışma şartları iBP için 27’yi aşmayacak olsa da fBP için bu değerlere yakın bir çalışma sıcaklığı görülebilir. Belirlenen bu ömür sonunda ürünün fanlarının değiştirilmesi gerekmektedir. Fan değişim

Tablo 4. Kalibrasyon işlemleri neticesinde elde edilen CRAC kayıp katsayısı, fan hızı ve fan gücü değerleri
(CRAC loss coefficient, fan speed and fan power values obtained as a result of the calibration process)

	Klima 1	Klima 2	Klima 3	Klima 4	Klima 5	Klima 6	Klima 7
Kayıp katsayısı	49,77	45,92	80,70	67,64	84,14	65,62	51,75
Fan hızı (%)	79,47	79,47	79,90	79,90	79,90	80,89	80,89
Fan gücü (kW)	7,150	7,443	3,651	3,968	3,583	6,800	7,627

maliyeti birim başına sırasıyla 885 avro [34] ve 700 ABD doları [35] olarak paylaşılmıştır. Gerek veri merkezi kritik çalışma şartları nedeniyle, gerekse de ekonomik analiz sonuçlarını daha muhafazakâr varsayımlara dayandırmak amacıyla daha yüksek değişim sıklığı (5 yıl) değerlendirilmiştir [34]. 15 yıllık analizde NBD ve geri ödeme sürelerinde iki firmadan alınan ilk yatırım ve parça değişim maliyetlerinin belirgin bir farklılık oluşturmadığı görüldüğü için sadece bir firmadan alınan birim fiyatlar kullanılmıştır. Tablo 5 ekonomik analiz ile ilgili çeşitli kaynaklardan derlenen varsayımları özetlemektedir. Çeşitli veri merkezi iyileştirme yatırımları için literatürde indirgeme oranı olarak %8 ve kullanım ömrü olarak 15-20 yıl varsayılmıştır [30, 36, 37]. Bu nedenle bu çalışmada da benzer yaklaşım tercih edilmiştir. Fanların ekonomik ömrü ASHRAE tarafından da benzer şekilde 15-20 yıl arasında kabul edilmiştir [38]. Türkiye İstatistik kurumunun 2004-2019 arasındaki verisi baz alınarak ortalama enflasyon oranı %9,5 varsayılmıştır [39]. Bu değer bakım ve parça değişim maliyetlerinin farklı yıllardaki hesaplanmasında kullanılmaktadır. İşçilik maliyetlerindeki yıllık artış asgari ücret artış oranı olarak tespit edilen %11,3 oranı ile temsil edilmiştir [40]. İşletme maliyetleri ve tasarruflar elektrik fiyatlarına doğrudan bağlıdır. Bu değer Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ) kayıtlarına göre 0,73 TL/kWh olarak belirlenmiştir [41]. Elektrik fiyatının 2008'den bu yana değişimi göz önünde bulundurularak yıllık artışının %11,2 olacağı varsayılmıştır [41]. İthal ürünler için kullanılan döviz kurları da Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası'ndan elde edilmiştir [42].

Bu çalışma, açık koridorlu pilot veri merkezinde koridor kapatma uygulaması ve CRAC fan hızının değiştirilebilmesi senaryoları için değişken hızlı sürücü maliyetlerini de göz önünde bulundurmaktadır. Üretici [43-45] ve tedarikçi [46-48] firmalarla yapılan görüşmelerde koridor kapatma uygulamasının maliyetinin farklı malzeme ve tasarımlar için 40 bin ile 230 bin TL arasında değiştiği görülmüştür.

Buradan hareketle ortalama yaklaşık 125 bin TL değeri ekonomik analizde koridor kapatma yatırım maliyeti olarak değerlendirilmiştir. Diğer taraftan VSD için çeşitli kaynaklardan edinilen bilgiye göre kW başında 150 avro maliyet varsayımıyla, mevcut CRAC ünitelerinin fanları için yaklaşık toplam 60 bin TL'lik bir yatırım maliyeti öngörülmektedir [49].

3. BULGULAR (RESULTS)

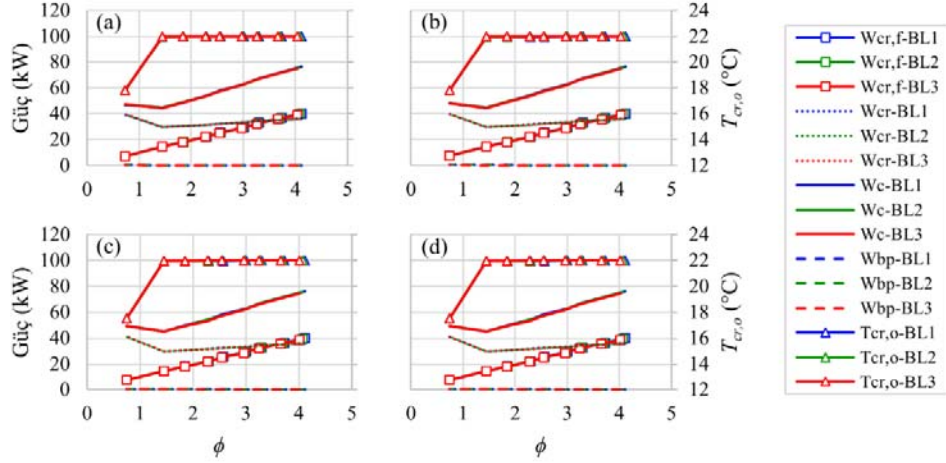
3.1. iBP Model Sonuçları (iBP Model Results)

Farklı sızıntı seviyesine sahip olacak şekilde tanımlanan başlangıç durumları (BL1,2,3) için klima kapatma senaryolarında soğutma altyapısı, klima kompresörü, klima fanı ve BP fanının harcadığı güç ve klima çıkış sıcaklığının değişimi iBP yöntemi için Şekil 7'de verilmiştir. Farklı BP fan sayılarına ilişkin sonuçlar 4 ayrı grafikte ele alınmıştır. Yatay ekseninde verilen ϕ değerinin tanımı klima hava akışının (\dot{C}_{cr}) sunucu hava akışına (\dot{C}_r) oranıdır. Bütün klimalar devrede olduğunda ϕ , 4,0 değerinden fazladır. Bunun sebebi klimaların ihtiyacın yaklaşık 5 katı kapasiteye sahip olmasıdır ve Turkmen vd. [27] tarafından da bu hususa dikkat çekilmiştir. Klimalar devreden çıktıkça veya değişken hızlı klima fan hızları azaldıkça ϕ değeri azalır. Sunucular CA hattından ihtiyaç duydukları hava akışını temin edemeyecek duruma gelince BP fanları devreye girer. Şekil 7'ye göre farklı sızıntıya sahip başlangıç senaryoları (BL1,2,3) ve farklı fan sayılarıyla elde edilen sonuçlarda kayda değer bir farklılık görülmemektedir. BP fan gücünün toplam soğutma altyapı gücüne göre gerek düşük basınç farkı gerekse de düşük akış miktarı nedeniyle neredeyse göz ardı edilebilir seviyede olması, farklı fan sayılarının etkisini sınırlandırmıştır.

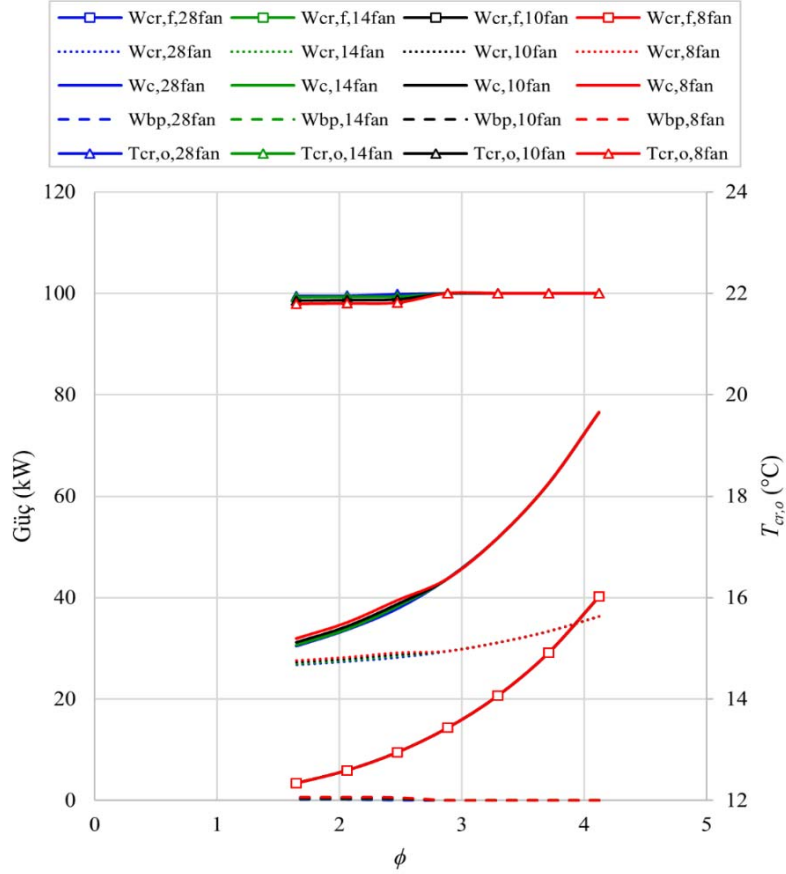
CRAC fan hızının değiştirilebildiği (VSD) senaryolarda ise klima BP yönteminin optimizasyon sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Farklı başlangıç durumlarında belirgin bir

Tablo 5. Ekonomik analiz ile ilgili varsayımlar (Assumptions for the economic analysis)

Konfigürasyon	Birim	Değer	Kaynak
fBP fan sayısı	Adet	7-9	-
iBP fan sayısı	Adet	8-28	-
Fan destekli menfez fiyatı	€/adet	2380	[34]
Fan destekli menfez bakım maliyeti	TL/adet/yıl	200	[34]
Fan değişim sıklığı	1/yıl	5	[34]
Fan değişim maliyeti	€/adet	885	[34]
Elektrik tarifesi	TL/kWh	0,73	[41]
ABD doları kuru	TL	8,18	[42]
Avro kuru	TL	9,72	[42]
Ekonomik analiz için ekonomik ömür	Yıl	15	[30,36,37,38]
İndirgeme oranı	%	8	[30,36,37,38]
Ücret artışı	%	11,3	[40]
Enflasyon	%	9,5	[39]
Elektrik tarifesi artışı	%	11,2	[41]
Koridor kapatma maliyeti	TL	125000	[43-48]
Değişken fan hızı uygulama maliyeti	TL	60000	[49]



Şekil 7. Farklı başlangıç durumları ve (a) 28 (b) 14 (c) 10 (d) 8 fanlı iBP senaryoları için optimizasyon sonuçları (Optimization results for different baseline cases and iBP scenarios with (a) 28 (b) 14 (c) 10 (d) 8 fans)



Şekil 8. BL1 durumunda değişken klima fan hızıyla iBP yöntemi senaryoları için optimizasyon sonuçları (Optimization results of iBP method for the BL1 case with VSD)

farklılık olmaması nedeniyle sadece BL1 için farklı fan sayılarına dair sonuçlar sunulmaktadır. Özellikle fan gücünün fan hızının kübüyle orantılı olması nedeniyle toplam soğutma gücünün klima kapatma senaryolarına göre daha düşük seviyelere ulaştığı görülmektedir. Şekil 8’de klima kapatma senaryolarında en düşük \dot{W}_c değeri 45 kW

iken, VSD kullanılan durumlarda 30 kW’a kadar düşmüştür. Bu sonuçlarda klima fan hızlarının en fazla %40’a kadar ($\phi \sim 1,65$) düşürüldüğünü not etmek gerekir. Şekilde soğutma gücünün daha düşük klima akış değerlerinde daha da azalabileceği görülmektedir. Bu durum Turkmen vd. [27] tarafından pilot veri merkezi için yapılan değerlendirmede

bahsedildiği gibi veri merkezi klimalarının soğutma ihtiyacının çok üstünde kapasiteye sahip olduğunun bir başka göstergesidir.

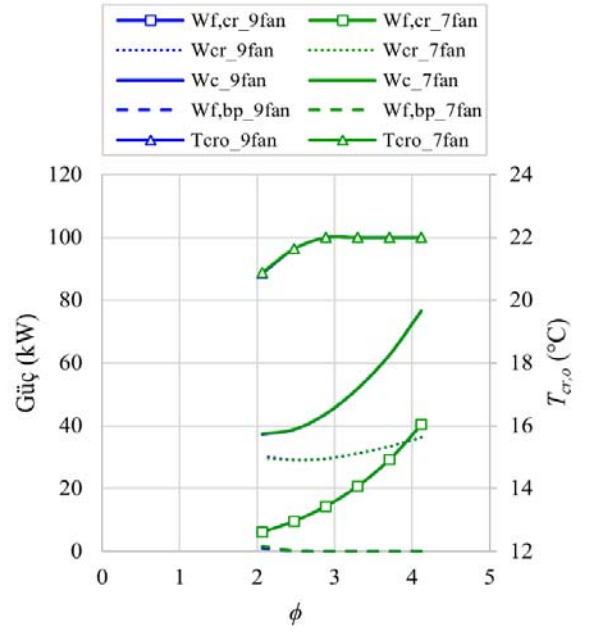
3.2. fBP Model Sonuçları (fBP Model Results)

Klima kapatma senaryolarında fBP yöntemiyle elde edilen güç ve klima çıkış sıcaklığı değişimi Şekil 9'da verilmiştir. iBP yönteminin aksine başlangıç durumları arasında az da olsa bir farklılık görülse de 7 veya 9 fan kullanılması arasındaki en belirgin farklılık fazla fan kullanmanın daha düşük ϕ değerlerine ulaşmaya imkân sağlamasıdır. Şekil 9a'da en düşük soğutma gücüne ulaşıldığı için fan sayısını daha fazla arttırmanın enerji performansı açısından olumlu bir etkisi beklenmemektedir. fBP yönteminde iBP'nin aksine artan BP akışıyla toplam sızıntı miktarında bir değişiklik olmamaktadır. Bu nedenle yöntemi uygulamadan önce veri merkezinde uygulanacak sızıntı azaltıcı tedbirler fBP yönteminin enerji tasarruf potansiyelini de arttırmaktadır. En az sızıntıya sahip BL3 bu nedenle fBP yöntemiyle en fazla enerji tasarrufunu sağlamaktadır. fBP yönteminde ϕ azaldıkça BP fan akışı ve gücü iBP yöntemine göre daha belirgin artış gösterir, veri merkezinde doğal olarak yer alan sızıntı artışı da fBP fanlarının akışını doğrudan etkiler. Ancak yine de toplam soğutma altyapı gücüyle karşılaştırıldığında BP fanlarının payı oldukça düşüktür.

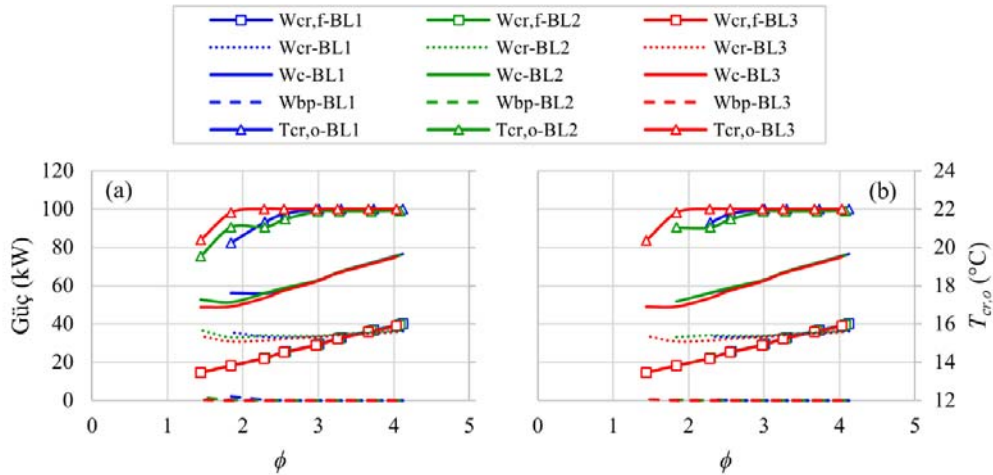
Klima fan hızının değiştirilebildiği senaryolarda fBP yöntemi optimizasyon sonuçları sadece BL1 için Şekil 10'da verilmiştir. Yüksek sızıntı miktarı nedeniyle en düşük klima fan akışı olan %40'a ulaşıldığında ($\phi=1,65$) ise BP fan hızları toplam akış ihtiyacını sağlayabilmek için kapasitelerini aşacak seviyede çalışma ihtiyacı duymaktadır. Bu nedenle Şekil 10'da verilenlerden daha düşük ϕ değerlerinde BP fanının kullanımı ancak bu ihtiyacı karşılayabilecek ürünlerle veya fan sayısı artırılarak söz konusu olabilir. Daha düşük ϕ değerlerinin toplam soğutma gücünün eğilimi göz önünde bulundurulduğunda bir avantaj sağlamadığı Şekil 10'da görülmektedir. Fan sayısı belirgin bir farklılık

göstermediği için 7 adet BP fanı kullanımının yeterli olduğu söylenebilir.

Yukarıdaki tüm senaryolardaki sonuçlara göre veri merkezinde başlangıç senaryosundan itibaren ($\phi=4,12$) BP fanlarının çalışmaya başladığı ϕ değerlerine kadar elde edilen kazanımlar aslında BP fanlarından ziyade koridor kapatma uygulamasının bir getirisidir. En tasarruflu çalışma şartları ancak BP fanlarının devreye girmesiyle elde edilmektedir. Koridor kapatma olmadan elde edilebilecek sonuçları değerlendirmek için ise oda ve plenum seviyesinde ilgili hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellerinin koşutlanması tavsiye edilir.



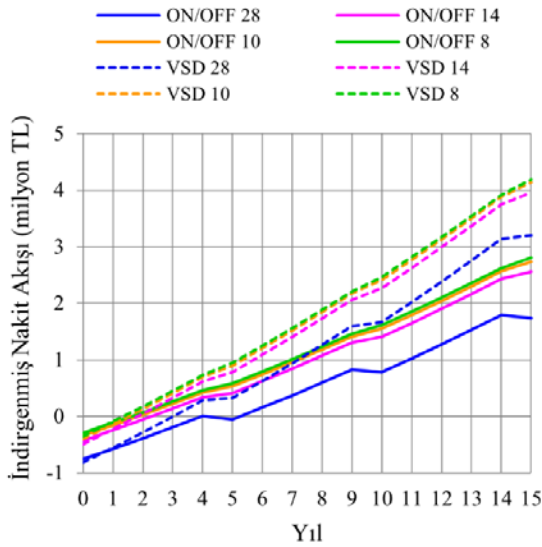
Şekil 10. BL1 durumunda VSD ile fBP yöntemi senaryoları için optimizasyon sonuçları
(Optimization results of fBP method for the BL1 case with VSD)



Şekil 9. (a) 9 ve (b) 7 fanlı fBP senaryoları için optimizasyon sonuçları
(Optimization results for fBP scenarios with (a) 9 and (b) 7 fans)

3.3. Ekonomik Analiz (Economic Analysis)

Klima BP yönteminin uygulanmasına dair başlıca yatırım kalemi BP fanlarının maliyetidir. Pilot veri merkezinde iBP ve fBP uygulamalarına ilişkin olası yatırımların indirgenmiş nakit akışları aşağıda verilmiştir (Şekil 11 ve 12). Pilot veri merkezine klima BP yöntemi uygulamak için mevcut sistemin üzerine BP fan donanımlarına ek olarak soğuk koridor kapatma uygulanması, hız değiştirme senaryoları için de klima fanlarına VSD entegre edilmesi değerlendirilmiştir. İlgili maliyetler ve ekonomik analize ilişkin detaylar yöntem başlığı altında paylaşılmıştır. iBP yöntemine ilişkin sonuçlarda yüksek sayıda fan kullanımının ilk yatırım maliyetinin yanı sıra tekrar eden fan değişim maliyetlerini de arttırması nedeniyle geri ödeme süreleri belirgin bir artış göstermektedir (Şekil 11). VSD uygulaması avantajlı gözükse de özellikle CRAC üniteleriyle ilgili teknik personel ile yaptığımız görüşmelerde özellikle pilot veri merkezindeki gibi soğutucu akışkan devreli ünitelerin hız değişimine yönelik işlemlerin cihaz soğutma çevrimiyle ilgili başka sorunlar doğurabileceği bilgisi paylaşılmıştır [29]. Bu nedenle ekonomik getiri açısından daha dezavantajlı gözükse de klima kapatma senaryolarının (ON/OFF) daha kesin ve güvenilir sonuçlar vermesi beklenebilir. Bu kapsamda özellikle 14 ve daha az sayıda BP fan kullanımıyla bahse konu iBP yöntemi yatırımın %20'nin üstünde bir değiştirilmiş iç karlılık oranıyla 2,5 yıldan az bir sürede geri ödemesi mümkün olabilecektir. iBP yöntemine ilişkin 15 yıllık bu yatırımın NBD'si sadece klima kapatma (ON/OFF) yöntemi kullanılarak dahi 2,5-3,0 milyon TL arasındadır.

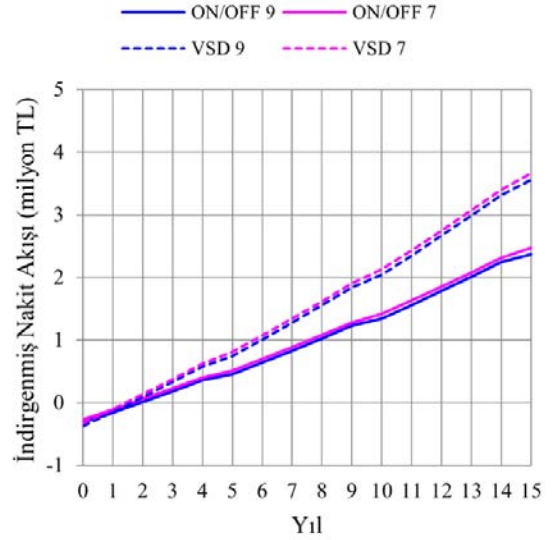


Şekil 11. iBP yönteminin ekonomik analiz sonuçları
(Economic analysis results of the iBP method)

fBP yönteminde benzer enerji performansları daha az sayıda BP fanı ile elde edildiği için ekonomik açıdan daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Yatırımların NBD'leri iBP ve fBP yöntemleri arasında benzerlik gösterse de fBP yönteminin düşük ilk yatırım maliyetleri nedeniyle geri ödeme süresinin iki yıldan daha kısa olması ümit vericidir. Buna karşılık

gelen değiştirilmiş iç karlılık oranları yüzde 25'in üzerindedir. Uygulama ile ilgili fBP fanlarının hazır bir ürün olarak bulunmaması bir sorun olarak görülebilir. Bunun dışında VSD uygulamasının CRAC üniteleri üzerine etkisiyle ilgili benzer sakıncalar fBP uygulaması için de mevcuttur.

iBP yöntemi için kullanılacak plenumdan odaya akış sağlayan fan ticari olarak hazır bir üründür. Diğer taraftan fBP yöntemi fanın ters yönde çalışmasına (odadan plenuma) ihtiyaç duyar. Bu nedenle fBP için gerekli olan fanlar ticari olarak hazır değildir. Bu çalışmada fBP fanlarının iBP fanlarıyla aynı fiyatta ve erişilebilir oldukları varsayılrsa da fBP yöntemine dair bir yatırım kararı esnasında bu hususun değerlendirilmesi gerekmektedir. iBP yöntemiyle ilgili bir başka maliyet kalemi, menfez sayısından daha az sayıda fan kullanılması halinde fanlar ile soğuk koridor menfezleri arasına kurulmasına gerek duyulacak geçiş kanalıyla ilgilidir. Böyle bir tasarımın malzeme ve teçhizat maliyetleri açısından avantajları olsa da kurulum maliyetinin daha fazla olması muhtemeldir. Ancak bu kalemin fan ilk yatırım maliyetlerinin yanında göz ardı edilebilir olacağı varsayılmıştır. Diğer taraftan klima BP fanı olarak değerlendirilecek ürün için piyasada yer alan ürünlerin ithal edilmeleri nedeniyle birim maliyetleri oldukça yüksektir. Yüksek teknoloji barındırmayan bu tarz ürünlerin ulusal imkanlarla üretilmesi ilk yatırım maliyetlerinde ciddi düşüşler sağlayıp yönteminin yaygınlaşmasına yardımcı olabilir.



Şekil 12. fBP yönteminin ekonomik analiz sonuçları
(Economic analysis results of the fBP method)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Klima BP yönteminin varsayımsal veri merkezlerindeki enerji verimliliği potansiyeline yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Yöntemin ilk defa, çalışan bir veri merkezine uygulandığı bu çalışmada enerji ve ekonomik unsurları göz önünde bulunduran bir yapılabirlik analizine

yer verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre sistemin uygulanabilirliği tasarımın ihtiyaç duyduğu fan sayısına doğrudan bağlıdır. iBP yönteminin pilot veri merkezinde her menfeze bir fan kullanımını ön gören 28 fanlı durum için ekonomik analiz sonuçları 3-4 yıllık geri ödeme süresi ve yüzde 20'nin altında iç karlılık oranı ortaya koymaktadır. 8 fan kullanılan iBP uygulamasının ise yüzde 25'in üstünde iç karlılık oranıyla yatırımı 2 yıldan az sürede geri ödemesi beklenmektedir. Yöntemin sadece klimaları devreden çıkartarak ve 8-14 BP fanıyla uygulanmasının net bugünkü değeri 2-3 milyon TL arasındadır. fBP uygulaması ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması nedeniyle düşük fan sayılı iBP yöntemi sonuçlarına benzerlik gösterir. BP yönteminin sadece değişken hızlı fanları olan klimalarla değil, fazla kapasite oluşturan sabit hızda fanlara sahip klimaların kontrollü bir şekilde kapatılmasına paralel olarak kurgulandığında dahi önemli enerji tasarrufları sağlanması uygulamayı kolaylaştırabilecek bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Genel olarak, makul olarak değerlendirilen 8 fanlı iBP ve 7 fanlı fBP konfigürasyonları için geri ödeme süreleri 1,6 yıl olarak hesaplanmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 118M238 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir. Model geliştirme aşamasında sonuçlarından yararlanan pilot veri merkezine ilişkin çalışma ise İstanbul Teknik Üniversitesi'nin (İTÜ) 40576 nolu genel araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiş, ilgili çalışmanın hesaplama ihtiyaçları İTÜ Ulusal Yüksek Başarılı Hesaplama Merkezi UHEM'in 1006272019 nolu projesinden karşılanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Kim D.W., Kim Y.M., Lee S.E., Development of an energy benchmarking database based on cost-effective energy performance indicators: Case study on public buildings in South Korea, *Energy and Buildings*, 191, 104-116, 2019.
- Altun M., Meral Akgül Ç., Akçamete A., Effect of envelope insulation on building heating energy requirement, cost and carbon footprint from a life cycle perspective. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (1), 147-164, 2019.
- Ertürk M., Calculation amount of carbon dioxide and sulfur dioxide per capita area, per unit area for the heating period: Example of Izmir, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 319-332, 2020
- Ekşi Kılıçaslan A., Kus H., Evaluation of the hygrothermal performance of external thermal insulation applications on the outer walls of existing buildings. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 89-104, 2020.
- Masanet E., Shehabi A., Lei N., Smith S., Koomey J., Recalibrating global data center energy-use estimates, *Science*, 367, 984-986, 2020.
- Belady C., Rawson A., Pflueger D., Cader T., Green Grid Data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCiE The Green Grid, White Paper No. 6, 2008.
- ISO. Information Technology -- Data Centres -- Key Performance Indicators -- Part 2: Power Usage Effectiveness (PUE), 2016, <https://www.iso.org/standard/63451.html>.
- Shehabi A., Smith S., Sartor D.A., Brown R.E., Herrlin M., Koomey J.E., Masanet E.R., Horner N., Azevedo I.L., Lintner W., United States Data Center Energy Usage Report. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL-1005775. June 27, 2016, <https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy>.
- Patankar S.V., Airflow and cooling in a data center, *J. Heat Transfer* 132, 73001-1-73001-17, 2010.
- ASHRAE, Thermal Guidelines for Data Processing Environments, 4th Edition, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2015.
- ASHRAE, Air distribution. In: Design Considerations for Datacom Equipment Centers, 2nd Ed. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2009.
- Seymour M., Chapter 17: Computational Fluid Dynamics Applications in Data Centers, *Data Center Handbook*, Editör: Geng H., John Wiley & Sons, 313-341, 2015.
- Salim M., Tozer R., Data Centers' Energy Auditing and Benchmarking-Progress Update, *ASHRAE Trans.*, 116 (1), 2010.
- Khalifa H.E., Demetriou D.W., Enclosed-aisle data center cooling system, Google Patents, 02-Feb-2012.
- Erden H.S., Yildirim M. T., Koz M., H.E. Khalifa, Energy assessment of CRAH bypass for enclosed aisle data centers, in Proc. IEEE ITherm, 433-439, Las Vegas, NV, USA, May/June. 2016.
- Demetriou D.W., Khalifa H.E., Optimization of Enclosed Aisle Data Centers Using Bypass Recirculation, *Journal of Electronic Packaging*, 134 (2), 2012.
- Kang S, Schmidt R.R., Kelkar K.M., Radmehr A., Patankar S.V., A methodology for the design of perforated tiles in a raised floor data center using computational flow analysis, *Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Las Vegas, 2000.
- Schmidt R., Karki K., Kelkar K., Radmehr A., Patankar S., Measurements and Predictions of the Flow Distribution Through Perforated Tiles in Raised Floor Data Centers, in Proceedings of ASME InterPACK '01, The Pacific Rim/ASME International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, Kauai, Hawaii, 2001.
- Erden H.S., Koz M., Yildirim M.T., Khalifa H.E., Experimental investigation of CRAH bypass for enclosed aisle data centers, in Proc. IEEE ITherm, 1293-1299, Las Vegas, NV, USA, May/June. 2016.

20. Erden H.S., Koz M., Yildirim M.T., Khalifa H.E., Experimental Demonstration and Flow Network Model Verification of Induced CRAH Bypass for Cooling Optimization of Enclosed-Aisle Data Centers, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7 (11), 1795-1803, 2017.
21. Erden H.S., Koz M., Yildirim M.T., Khalifa H.E., Optimization of Enclosed Aisle Data Centers with Induced CRAH Bypass, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7 (12), 1981-1989, 2017.
22. Athavale J., Joshi Y., Yoda M., Experimentally validated computational fluid dynamics model for data center with active tiles, *J. Electron. Packag.*, 140 (1), 10902, 2018.
23. Erden H.S., Investigation of Induced CRAH Bypass for Air-Cooled Data Centers Using Computational Fluid Dynamics, in *Proc. IEEE SoftCOM 2017, Split*, 1-6, 2017.
24. Ahmadi V.E., Erden H.S., Investigation of CRAH Bypass for Air-Cooled Data Centers using Computational Fluid Dynamics, *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC) 2018*, 1-6, 2018.
25. Ahmadi V.E., Erden H.S., A parametric CFD study of computer room air handling bypass in air-cooled data centers, *Applied Thermal Engineering*, 166, 114685, 2020.
26. ASHRAE, Duct design, *Fundamentals Handbook*. Atlanta, Georgia, ASHRAE, Ch. 34, 2001.
27. Turkmen I., Mercan C.A., Erden H.S., Experimental and Computational Investigations of the Thermal Environment in a Small Operational Data Center for Potential Energy Efficiency Improvements, *J. Electron. Packag.* 142 (3) 031116, 2020.
28. Moore J., Chase J., Ranganathan P., Sharma R., Making Scheduling "Cool": Temperature-Aware Workload Placement in Data Centers, *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference, Anaheim, CA*, 2005.
29. Vertiv, Rubén Fernandez, Gabriel Bonilha ve Hakan İçli ile eposta iletişimleri, 2020.
30. Gözcü O., Erden H.S., Energy and economic assessment of major free cooling retrofits for data centers in Turkey, *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 27 (3), 2097-2212, 2019.
31. Kierulff, H., MIRR: A better measure, *Business Horizons*, 51 (4), 321-329, 2008.
32. Mayes T.R., Shank T.M., *Financial Analysis with Microsoft Excel 2016*, Boston, MA, ABD. Cengage Learning, 2018.
33. Server Rack Online. Raised Floor Airflow Panels & Controllers/Dampers. <https://www.server-rack-online.com/airflow-panels.html>. Erişim tarihi Mart 7, 2021.
34. STULZ, Şenay Üner (Key Account Manager) ile eposta iletişimi, 2020.
35. TATE, Daniel Kennedy (General Manager) ile eposta iletişimi, 2020.
36. Spangler R., Jeffers G., Total cost of ownership comparison of air economizers to other energy saving techniques in data center applications, *ASHRAE Transactions*; 116 (2), 82-89, 2010.
37. Ganguly S., Shehabi A., Tschudi W.F., Gadgil A.J., *Impact of Air Filtration on the Energy and Indoor Air Quality of Economizer-based Data Centers in the PG&E Territory*, Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
38. ASHRAE, *Owning and Operating Costs, HVAC Applications*. Atlanta, Georgia: ASHRAE, Ch. 37.3, 2015.
39. Türkiye İstatistik Kurumu. Enflasyon ve fiyat, <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>. 2020.
40. Çalışma Genel Müdürlüğü, Yıllar itibarıyla günlük ve aylık asgari ücretler, Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, <https://www.ailevecalisma.gov.tr/media/35831/yillar-itibariyla-gunluk-ve-aylik-asgari-ucret-01-07-1974-31-12-2020.pdf>. 2020.
41. TEDAŞ, Elektrik Tarifeleri, http://www.tedas.gov.tr/#!/tedas_tarifeler. 2020.
42. TCMB, Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları, https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html. 9 Kasım 2020,
43. Lande, Pınar Çınar Özdemir (Yurtiçi Satış Sorumlusu) ile eposta iletişimi, 2020.
44. Mirsan, Neşe Doğan (Yurtiçi Satış Temsilcisi) ile eposta iletişimi, 2020.
45. Vertiv, İlke Çakabey (Thermal Sales Manager) ile eposta iletişimi, 2020.
46. EAE Elektroteknik, Elektroteknik Taşeron Firma (Çelik Cam Yapı), Cemal Çelik (Firma Sahibi) ile eposta iletişimi, 2020.
47. Erfa Mühendislik, Erhan Sagin (Elektrik Mühendisi) ile eposta iletişimi, 2020.
48. Cns Teknoloji ve Mühendislik, Cengiz Peltek (Data Center, Infrastructure & IOT Solutions Manager) ile eposta iletişimi, 2020.
49. Oniks Kontrol, Sürücüler, <http://www.onxcontrol.com>. 2020.