T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARŞI AKIŞLI ISLAK TİP SOĞUTMA KULELERİNDEKİ FİLM DOLGU MALZEMELERİNİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Caner TUKTA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ

Temmuz, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARŞI AKIŞLI ISLAK TİP SOĞUTMA KULELERİNDEKİ FİLM DOLGU MALZEMELERİNİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Caner TUKTA tarafından hazırlanan tez çalışması 11.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı-Proses Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Hakan DEMİR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Aliihsan KOCA, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Karşı Akışlı Islak Tip Soğutma Kulelerindeki Film Dolgu Malzemelerinin Performanslarının İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Caner TUKTA

İmza

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmasına yön vererek çalışmalarımı yöneten, değerli görüşleri ile katkıda bulunan danışman hocam Prof. Dr. Sayın Ş. Özgür ATAYILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Niba Su Soğutma Kuleleri San. ve Tic. A.Ş.'de işe başladığım günden yüksek lisans tez çalışmamı noktaladığım ana dek desteklerini eksik etmeyen ve her türlü imkânı sunan Sayın Ersan BAKANAY, Sayın Murat BAKANAY ve Sayın Birey BAKANAY'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Çalışmanın farklı aşamalarında verdiği bilgi ve önerileri ile çalışmama destek olan değerli arkadaşım Arş. Gör. Sayın Atalay YILDIRIM'a katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Gerek yüksek lisans tez çalışmam süresince gerekse de Niba Su Soğutma Kuleleri San. ve Tic. A.Ş.'de işe başladığım günden bu ana dek desteklerini eksik etmeyen Sayın H. Oğuz GÜRSOY'un şahsında tüm mesai arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bugüne gelmemde en büyük katkıları olan aileme en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ve son olarak, her şeyde olduğu gibi yüksek lisans eğitimime başlamamdan bitirmeme kadar olan süreçte verdiği destekle, sevgili arkadaşım Tuğçe YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Caner TUKTA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 Giriş 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 2
1.3 Bulgular 2
2 Literatür Araştırması 4
3 Soğutma Kuleleri 8
3.1 Soğutma Kulesi Tipleri 9
3.1.1 Temas Durumuna Göre 9
3.1.2 Hava Akımının Türüne Göre 9
3.1.3 Hava Akımının Yönüne Göre 10
3.2 Soğutma Kulesi Terminolojisi 11
3.3 Soğutma Kulesi Bileşenleri 13
3.3.1 Fan 13
3.3.2 Elektrik Motoru 13
3.3.3 Damla Tutucular 13
3.3.4 Sıcak Su Dağıtım Sistemi ve Fıskiyeler 14

3.3.5 Dolgu Malzemesi 14
3.3.6 Ana Gövde 16
3.3.7 Su Havuzu 17
4 Teorik İnceleme 18
4.1 Açık Çevrim Soğutma Kulelerinde Isı ve Kütle Transferi 18
4.2 Açık Çevrim Soğutma Kulelerinde Hava Tarafı Basınç Düşümü 26
4.3 Ekonomik Analiz 27
5 Deneysel Çalışmalar 28
5.1 Deney Tesisatı 28
5.2 Deneysel Çalışmalar 31
5.2.1 Deneysel Sonuçlar ve Analiz 34
5.2.2 Ekonomik Analiz 39
6 Sonuçlar ve Değerlendirme 43
Kaynakça 45
Tezden Üretilmiş Yayınlar 47

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
A_1	1. Yıldaki ilk nakit akışı
c_p	Sabit basınçta özgül ısı
c_v	Sabit hacimde özgül ısı
c_{pma}	Hava-su buharı karışımının özgül ısısı
C, n	Dolgu performans karakteristik katsayıları
C_1, C_2, C_3	Dolgu malzemesi basınç düşümü katsayısı deneysel sabitleri
e	Etkinlik
g	Elektrik fiyatı yıllık artış oranı
G_a	Kütlesel hava akısı
G_w	Kütlesel su akısı
h_c	Taşınım ısı transfer katsayısı
h_d	Kütle transfer katsayısı
h_{fg}	Gizli ısı
h_{ma}	Birim kuru hava kütlesi için hava-su buharı karışımının entalpisi
h_{masw}	Yerel yığın su sıcaklıklarında değerlendirilen doymuş havanın entalpisi
h_{ss}	Aşırı doymuş havanın entalpisi
h_v	Yığın su sıcaklığında değerlendirilen su buharının entalpisi
i	Faiz oranı
KaV/L	Boyutsuz performans katsayısı, transfer karakteristiği
K_{dolgu}	Dolgu malzemesi basınç düşümü katsayısı
L_{fi}	Dolgu malzemesi yüksekliği
L/G	Su ve havanın kütlesel debileri oranı

Me	Merkel Sayısı
m_a	Kuru hava miktarı
m_g	Belirli bir sıcaklıktaki havada bulunabilecek en fazla su buharı miktarı
m_v	Havanın içerdiği su buharı miktarı
$\dot{m}_a$	Hava kütlesel debisi
$\dot{m}_w$	Su kütlesel debisi
n	Süre
P_g	Belirli bir sıcaklıktaki suyun doyma basıncı
P_v	Su buharı kısmi basıncı
$\dot{Q}$	Enerji transferi
R	Soğutma aralığı
T_a	Hava sıcaklığı
T_w	Su sıcaklığı
T_{wi}	Su giriş sıcaklığı
T_{wo}	Su çıkış sıcaklığı
V_a	Hava hızı
z	Yükseklik
Ø	Bağıl nem
ω	Özgül nem, mutlak nem
ω_{sw}	Havanın yerel yığın su sıcaklığında değerlendirilen doygunluk özgül nem değeri
ω_{sa}	T_a sıcaklığındaki doymuş havanın özgül nem değeri
ΔP_{dolgu}	Dolgu malzemesi boyunca gerçekleşen hava tarafı basınç düşümü
ρ_a	Hava yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTI	Cooling Technology Institute
CTP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
MDF	Medium Density Fiberboard
NTU	Transfer Üniteleri Sayısı
PP	Polipropilen
PVC	Polivinil Klorür

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Islak Tip ve Kapalı Çevrim Soğutma Kuleleri 9
Şekil 3.2 Cebri İtişli, Cebri Çekişli ve Doğal Çekişli Soğutma Kuleleri 10
Şekil 3.3 Karşı Akışlı ve Çapraz Akışlı Soğutma Kuleleri 11
Şekil 3.4 Damla Tutucu 14
Şekil 3.5 Sıcak Su Dağıtım Sistemi 14
Şekil 3.6 Sıçratma Tipi Dolgu 15
Şekil 3.7 Trickle Tipi Dolgu 16
Şekil 3.8 Film Tipi Dolgu 16
Şekil 4.1 Karşı Akışlı Dolgu Malzemesi için Kontrol Hacmi 18
Şekil 4.2 Chebyshev Tekniği ile KaV/L İfadesi 25
Şekil 5.1 Soğutma Kulesi Test Düzeneği 28
Şekil 5.2 Soğutma Kulesi Test Düzeneği (Şematik) 29
Şekil 5.3 Numune 1, Numune 2, Numune 3, Numune 4 Genel Görünüş Resimleri 30
Şekil 5.4 Numune 1 KaV/L - L/G Eğrisi 35
Şekil 5.5 Numune 2 KaV/L - L/G Eğrisi 35
Şekil 5.6 Numune 3 KaV/L - L/G Eğrisi 35
Şekil 5.7 Numune 4 KaV/L - L/G Eğrisi 36
Şekil 5.8 Numune1, Numune 2, Numune 3 ve Numune 4 KaV/L - L/G Eğrileri 36
Şekil 5.9 Eşit Kule Oturma Alanı için Ekonomik Analiz Sonuçları 41
Şekil 5.10 Dolgudaki Eşit Hava Hızı Değerleri için Ekonomik Analiz Sonuçları 41

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1 Test Edilecek Dolgu Malzemeleri Özellikleri 30
Tablo 5.2 Numune 1 için Deneysel Parametreler 31
Tablo 5.3 Numune 2 için Deneysel Parametreler 32
Tablo 5.4 Numune 3 için Deneysel Parametreler 33
Tablo 5.5 Numune 4 için Deneysel Parametreler 34
Tablo 5.6 Eşit Kule Oturma Alanında Karşılaştırma 37
Tablo 5.7 Dolgudaki Eşit Hava Hızı Değerlerinde Karşılaştırma 38
Tablo 5.8 Ekonomik Analizde Kullanılan Parametreler 40
Tablo 5.9 Eşit Kule Oturma Alanı için Ekonomik Analiz Sonuçları 40
Tablo 5.10 Dolgudaki Eşit Hava Hızı Değerleri için Ekonomik Analiz Sonuçları... 40

ÖZET

Karşı Akışlı Islak Tip Soğutma Kulelerindeki Film Dolgu Malzemelerinin Performanslarının İncelenmesi

Caner TUKTA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ

Soğutma kuleleri suyun küçük bir kısmını hava akımına buharlaştırmak yoluyla su soğutmak için tasarlanmış ısı atma cihazlarıdır. Islak tip soğutma kulelerinde daha büyük bir su yüzeyinin daha uzun bir süre hava akımına temas etmesini sağlayan çeşitli dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında Merkel Metodu kullanılarak iki farklı hatve ve iki farklı yükseklik değerine sahip PVC film tipi dolgu malzemelerinin performansları incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler neticesinde dolgu malzemelerinin ısıl yeteneklerini değerlendirmeye olanak tanıyan dolgu karakteristik eğrileri ve dolgu performans karakteristik katsayıları tespit edilmiştir. Ardından, literatürde yaygın olarak verilen bir dolgu malzemesi hava tarafı basınç düşümü katsayısı korelasyonunun deneysel sabitleri elde edilmiştir. Sonrasında, dolgu malzemeleri aynı giriş şartlarında hem eşit kule oturma alanı hem de dolgudaki eşit hava hızı değerleri için Merkel Metodu ve literatürde verilen en genel hava tarafı basınç düşümü korelasyonu kullanılarak yeniden sınanmıştır. Bu sayede aynı soğutma performansı sağlanırken gerektirecekleri hava debisi ve neden olacakları hava tarafı basınç düşümü

değerleri hesaplanmış, bu değerler için sırasıyla fan ve motor seçimi yapılarak ortalama bir kullanım süresi için işletme maliyetleri karşılaştırılmıştır. Buna göre eşit kule oturma alanında, dar hatveli ve yüksek dolgu malzemesinin diğer dolgu malzemelerine kıyasla yüksek performanslı çalışarak kullanım ömrü süresince daha düşük bir işletme maliyeti gerektireceği görülmüştür. Dolgudaki eşit hava hızı değerleri içinse dar hatveli ve yüksek dolgu malzemesinin daha küçük bir kule oturma alanı gerektireceği fakat yüksek bir işletme maliyetine neden olacağı; geniş hatveli ve alçak dolgu malzemesinin ise yüksek bir oturma alanı gerektirirken daha düşük bir işletme maliyeti gerektireceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Soğutma Kulesi, Merkel Metodu, Film Dolgu

ABSTRACT

Investigation of the Performance of Film Fill Media in Counterflow Wet Type Cooling Towers

Caner TUKTA

Department of Mechanical Engineering

Master Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ

Cooling towers are heat rejection devices designed to cool water by evaporating a small portion of the water to the air stream. In wet-type cooling towers, different fill medias are used, which allow a larger water surface to come into contact with the air stream for a longer period. In this thesis, the performances of PVC film type fill medias which have two different pitches and two different heights were investigated by using Merkel Method. As a result of the tests, fill characteristic curves and performance characteristic coefficients were determined, which allow the evaluation of the thermal capability of the fill medias. Secondly, experimental constants of an air-side pressure drop coefficient correlation which is commonly given in the literature were obtained. Then, the fill medias were tested for both the same tower layout area and the same air velocity values in the fill media with the same initial conditions using the Merkel method and the most general air pressure drop correlation in the literature. Thus, the air flow rate and the air-side pressure drop values that the fill medias will require were calculated for the same cooling performance, and operating costs were compared for an average lifetime by selecting fan and motor respectively. It was observed that the narrow-pitch and higher fill media will work with higher performance compared to other fill medias

and will require a lower operating cost during the lifetime for the same tower layout area. For the same air velocity values in the fill medias, it was determined that the narrow-pitch and higher fill media will require a smaller tower layout area but will cause a higher operating cost and the wide-pitch and lower fill media will cause a lower operating cost but will require a bigger layout area.

Keywords: Cooling Tower, Merkel Method, Film Fill

1
Giriş

Soğutma kuleleri, suyun küçük bir kısmını hava akımına buharlaştırmak yoluyla su soğutmak için tasarlanmış ısı atma cihazlarıdır. Temel fonksiyonları suya yüklenen atık ısıyı atmosfere aktarmaktır. Proses hem ısı hem de kütle transferini içermektedir [1].

Soğutma kuleleri güç üretim tesislerinde, sanayinin çeşitli kollarında, soğutma ve iklimlendirme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termik santraller gibi güç üretim tesisleri için çok büyük kapasitelerde tasarlanabildikleri gibi; demir-çelik, çimento, MDF, kağıt, kimya vb. sanayi için orta ve küçük kapasitelerde, çoğunlukla paket tip olarak dizayn edilmektedirler.

Günümüzde birkaç çeşit soğutma kulesi tipi yaygın olarak kullanılmaktadır. En çok kullanılanı suyun kuleye üst taraftan girip aşağı yönde aktığı ve hava akımının ise kulenin üst tarafına yerleştirilen bir fan yardımıyla oluşturulduğu mekanik çekişli soğutma kuleleridir. Hava ve su akımı karşı akışlı ya da çapraz akışlı olabilmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Literatür incelendiğinde soğutma kuleleri üzerine 20. yüzyılın başından günümüze kadar birçok çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar içinde Merkel Metodu, soğutma kulesi teorileri için temel oluşturması bakımından büyük bir önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir bölümünü soğutma kulesi teorileri üzerine yeni bir model oluşturma ve dolgu malzemelerinin performansını kıyaslama çalışmaları oluşturmaktadır. Bu kapsamda çapraz oluklu ve kıvrımlı PVC film tipi dolgu malzemelerinin diğer dolgu malzemelerine kıyasla daha iyi bir ısı transferi ve basınç düşümü kombinasyonunu verdiği sonucuna varılmıştır. Bu bölümde özellikle karşı akışlı, ıslak tip soğutma kulesi dolgu malzemelerinin

performanslarını konu edinen çalışmalar incelenecektir. Detaylı literatür araştırması “Bölüm 2”de verilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, Merkel Metodu kullanılarak, iki farklı hatve ve iki farklı yükseklik değerine sahip karşı akışlı, ıslak tip soğutma kulesi PVC film tipi dolgu malzemelerinin performanslarının değerlendirilmesi ve örnek bir durum için işletme maliyetlerinin karşılaştırılmasıdır.

1.3 Bulgular

Soğutulacak suyun ve ortam havası karakteristiklerinin uygun olması durumunda, enerji tüketiminin ön planda olduğu ya da alanın sınırlı olduğu soğutma kulesi uygulamalarında dolgu malzemesinin seçimi büyük bir önem arz etmektedir. Dolgu malzemesinin doğru seçimiyle işletme maliyetlerinde önemli miktarlarda parasal tasarruflar söz konusu olabilmektedir. Bu kapsamda öncelikle, gerçekleştirilen testler neticesinde incelenen dolgu malzemelerinin karakteristik eğrileri (KaV/L – L/G) ve dolgu performans karakteristik katsayıları tespit edilmiştir. Aynı L/G değerleri için daha yüksek KaV/L değerlerine sahip dar hatveli ve yüksek dolgu malzemesinin, diğer dolgu malzemelerine kıyasla daha yüksek bir soğutma kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür. Benzer şekilde daha düşük KaV/L değerlerine sahip geniş hatveli ve alçak dolgu malzemesi ise daha düşük bir ısıl performans sergilemektedir. İkinci olarak, incelenen dolgu malzemeleri için literatürde yaygın olarak verilen bir hava tarafı basınç düşümü katsayısı korelasyonunun deneysel sabitleri elde edilmiştir.

Günümüzde soğutma kulelerinde çeşitli hatve ve yüksekliklerde PVC film tipi dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Bu dolgu malzemelerinin doğru seçimi ile soğutma ihtiyacını eşit kule oturma alanında daha düşük bir işletme maliyetiyle ya da yüksek bir işletme maliyetiyle daha küçük bir oturma alanında çözmek mümkün olmaktadır. Çoğunlukla birinci durumla enerji verimliliği uygulamalarında, ikinci durumla ise kule oturma alanının sınırlı olduğu soğutma kulesi uygulamalarında karşılaşılmaktadır. Ayrıca soğutma kulelerinde doğru dolgu malzemesinin

kullanılmasıyla kule ömrü boyunca işletme maliyetinde önemli miktarlarda parasal tasarruflar elde edilebilmektedir. İncelenen örnek durum için eşit kule oturma alanında, dar hatveli ve yüksek dolgu malzemesinin diğer dolgu malzemelerine kıyasla yüksek performanslı çalışarak kule ömrü ömrü süresince daha düşük bir işletme maliyeti gerektireceği görülmüştür. Dolgudaki eşit hava hızı değerleri içinse dar hatveli ve yüksek dolgu malzemesinin daha küçük bir kule oturma alanı gerektireceği fakat yüksek bir işletme maliyetine neden olacağı; geniş hatveli ve alçak dolgu malzemesinin ise büyük bir kule oturma alanına ihtiyaç duyarken daha düşük bir işletme maliyeti gerektireceği belirlenmiştir.

2
Literatür Araştırması

Literatür incelendiğinde soğutma kuleleri üzerine 20. yüzyılın başından günümüze kadar birçok çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar içinde Merkel Metodu, soğutma kulesi teorileri için temel oluşturması bakımından büyük bir önem arz etmektedir.

Mohiuddin ve Kant, ıslak tip karşı ve çapraz akışlı, mekanik ve doğal çekişli soğutma kulelerinin ısıl tasarımı üzerine gerçekleştirdikleri çalışmanın ilk bölümünde literatürdeki farklı sayısal modelleri ele almışlar ve kule tasarımını detaylı olarak sunmuşlardır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise dolgu malzemesi, su ve hava yükü, doğal çekişli kuleler, mekanik çekişli kuleler için fan tasarımı, blöf ve besleme suyu debileri ile su dağıtım sistemleri ve damla tutucular için tasarım adımlarını vermişlerdir [2, 3].

Milosavljevic ve Heikkilä, bir boyutlu ısı ve kütle dengesi denklemlerine dayanarak karşı akışlı, ıslak tip bir soğutma kulesi için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Farklı dolgu malzemelerinin performansını analiz etmek için iki pilot ölçekli soğutma kulesinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çapraz oluklu ve kıvrımlı plakalardan oluşan dolgu tipinin en iyi ısı transferi ve basınç kaybı kombinasyonunu verdiğini bulmuşlardır. Üç boyutlu CFD ile dolgu malzemesine doğru yukarı yönde hız alanını incelemişlerdir. Simülasyonlarda hava girişi ile dolgu malzemesi arasındaki dikey uzaklık arttıkça hava dağılımında kademeli bir iyileşme olduğu görülmüştür [4].

Söylemez, mekanik çekişli ve karşı akışlı soğutma kuleleri üzerine termoekonomik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada kule ömrü boyunca minimum maliyetin mevcut olduğu optimum ısı ve kütle transferi alanı incelenmiştir. Isı ve kütle transferi alanı arttıkça toplam maliyetin (ilk yatırım ve işletme maliyetleri toplamı) optimum ısı ve kütle transferi alanına karşılık gelen bir noktaya kadar düştüğü

gösterilmiş, soğutma kulelerinin bu minimum maliyet noktasına yakın olarak tasarlanması gerektiği söylenmiştir [5].

Khan vd., karşı akışlı ve ıslak tip soğutma kulelerinde buharlaşma ve taşınım ısı transferi hızlarının toplam ısı transferi hızına katkılarını araştırmışlar ve örnek bir problemle baskın ısı transfer yönteminin buharlaşma ile olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca aynı dolgu için suyun kütlesel debisindeki artışla, taşınım ve buharlaşma için gerekli yüzey alanının azaldığını ve daha yüksek su çıkış sıcaklıkları ile düşük ısı transfer hızları elde edildiğini belirtmişlerdir [6].

Kloppers ve Kröger, ıslak tip soğutma kuleleri dolgu malzemelerinin basınç kaybı üzerine yaptıkları bir çalışmada sıçratma tipi, trickle ve film dolgu malzemelerinin basınç kaybı katsayılarını, su ve havanın kütlesel akılarına bağlı olarak ampirik denklemlerle ifade etmişlerdir [7].

Khan vd., soğutma kulelerinin risk bazlı performans özelliklerini araştırmak için bir kirlenme modeli kullanmışlardır. Verilen kirlenme modeli için etkinlikte yaklaşık %6,0 azalma ve su çıkış sıcaklığında yaklaşık %1,2 artış görülmüştür. Ek olarak kötü koşullar altında hedeflenen ısıl performansı yakalamak için kule hacminin arttırılması gerektiğini örnek bir problemle sunmuşlardır [8].

Fisenko vd., mekanik çekişli soğutma kuleleri için ısı ve kütle transferi ile damlacıkların düşüş dinamiğini tanımlayan bir sınır değer problemini temsil eden yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Önerilen model, değişen atmosferik koşullar altında mekanik çekişli bir soğutma kulesinin performansını optimize etmeyi sağlamaktadır. Mekanik çekişli bir soğutma kulesinin ısıl etkinliğinin su ve havanın kütle akış hızları oranına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [9].

Kloppers ve Kröger; bir diğer çalışmalarında karşı akışlı, ıslak bir soğutma kulesi için Poppe, Merkel ve e-NTU modellerini yeniden türetmişlerdir. Ana denklemlerin kendilerine özgü gerekliliklerıyle nasıl çözülebileceğine dair ayrıntılı bir prosedür sunmuşlardır. Merkel ve e-NTU yöntemlerinin aynı basitleştirici varsayımlara dayandığından yaklaşık olarak aynı sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Dolgu performans testinde ve soğutma kulesi performans analizinde aynı yöntemin kullanılması gerektiğine vurgu yapmışlardır [10].

Kloppers ve Kröger, Lewis faktörünün doğal ve mekanik çekişli soğutma kulelerinin performans tahminine etkisini incelemişlerdir. Dolgu testi ve soğutma kulesi performans analizinde Lewis faktörünün aynı tanımının kullanılması durumunda, su çıkış sıcaklığının doğru bir şekilde tahmin edilebilebileceğini ifade etmişlerdir. Ortam havasının nispeten sıcak ve nemli olması durumunda Lewis faktörünün kule performansı üzerindeki etkisinin azaldığını ve buharlaşan su miktarının Lewis faktörünün gerçek değerinin bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir [11].

Gharagheizi vd., mekanik çekişli bir soğutma kulesi üzerine yaptıkları çalışmada kule karakteristiğini, su ve hava debileri oranını ve iki farklı film tipi dolgu malzemesi etkinliğini deneysel ve karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Soğutma kulesi performansının dolgu paketlerinin tipi ve düzenininden etkilendiğini, dikey oluklu dolgu paketlerinin yatay oluklu dolgu paketlerinden daha yüksek bir etkinliğe sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca kule performansının diğer soğutma kulesi çeşitlerinde olduğu gibi su ve hava debileri oranının artışıyla azaldığını ifade etmişlerdir [12].

Khorshidi vd., Merkel Metodunu kullanarak dikey, yatay ve çapraz oluklu olmak üzere üç tip film dolgu malzemesinin performansını İran'daki Bisotoun enerji santrali soğutma kulesi gerçek değerleriyle analiz etmişlerdir. Yüksek yüzey/hacim oranına ve yüksek kütle transferi katsayısına sahip olması nedeniyle çapraz oluklu film tipi dolgu malzemesinin en iyi performansı sergilediğini belirtmişlerdir [13].

Kotb, karşı akışlı soğutma kuleleri için soğutma kulesinin optimum yüksekliğini, buharlaşma hızını, hava ve su sıcaklıklarının dağılımını, nemi, su debisini ve kule yüksekliği boyunca Lewis faktörünü belirleyen bir matematiksel model sunmuştur. Kule yüksekliğinin esas olarak giriş havası bağıl neminden etkilendiğini, buharlaşma ile ısı transferinin baskın olduğunu ve Lewis faktörünün 0,91 - 0,924 aralığında olduğunu belirtmiştir [1].

Naik vd., karşı akışlı ve mekanik çekişli bir soğutma kulesinde meydana gelen birleştirilmiş ısı ve kütle transferi karakteristiklerini incelemek için bir sonlu farklar modeli geliştirmişlerdir. Bu model değişken parametreler olarak ısıl

etkinlik, kule yüksekliği ve nem etkinliğinden oluşmakta ve istenen performans değişkenlerini elde etmek amacıyla ısı ve kütle transferi katsayıları için bir korelasyon sağlamaktadır. Su giriş sıcaklığının, hava özgül nemi ve akış hızının soğutma kulesi performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu ifade edilmiştir [14].

Liu vd., yapmış oldukları bir çalışmada hava ve su debileri oranının karşı akışlı bir soğutma kulesi performansı üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada 2016 yılı Temmuz ayında Jinan'ın meteorolojik parametrelerine göre değişen hava ve su debileri oranının aynı sıcaklık aralığında çıkış suyu gereksinimini karşıladığı gösterilmiştir. Hava ve su debileri oranının kademeli olarak artarken, soğutma suyu çıkış sıcaklığının yavaş bir şekilde azalacağı, soğutma veriminin ise kademeli olarak artacağı belirtilmiştir. Yaş termometre sıcaklığının artmasıyla, soğutma suyu çıkış sıcaklığının ve soğutma veriminin artacağı ifade edilmiştir. Soğutma suyu aynı sıcaklık aralığına sahip olduğunda değişken metoorolojik parametreler için gerekli hava ve su debileri oranının farklı olacağı, bu yüzden soğutma kulesi çalışırken makul bir hava ve su debileri oranı seçilerek enerji tasarrufu sağlanacağı belirtilmiştir [15].

Literatür incelendiğinde gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir bölümünü soğutma kulesi teorisi üzerine yeni bir model oluşturma ve dolgu malzemelerinin performansını karşılaştırma çalışmalarının oluşturduğu görülmüştür. Dolgu malzemelerinin performansını konu edinen çalışmalarda, dar ve geniş hatve değerleri ile farklı yüksekliklere sahip PVC film tipi dolgu malzemelerinin performans incelemesi ve ekonomik analiz çalışmalarına rastlanmamıştır. Bu çalışmada iki farklı hatve ve iki farklı yükseklik değerine sahip PVC film tipi dolgu malzemelerinin performansları incelenmiş, örnek bir durum için paranın zaman değeri ve ekonomik parametreler dikkate alınarak Bügünkü Değer Yöntemi ile bir ekonomik analiz gerçekleştirilmiş ve dolgu malzemesi seçimine bağlı olarak ortalama bir kule ömrü süresince gerçekleşecek işletme maliyetleri karşılaştırılmıştır.

3
Soğutma Kuleleri

Hava şartlandırma sistemlerinin ve endüstriyel proseslerin çoğu uzaklaştırılması gereken ısı üretmektedirler. Bu amaçla soğutucu yoğuşturucularından ya da endüstriyel proses ısı değiştiricilerinden ısıyı kaldırmak için çoğunlukla su bir ısı transfer aracı olarak kullanılmaktadır [16].

Soğutma kuleleri, ısı ve kütle transferi mekanizmalarını kullanarak suyu soğutan cihazlardır. Soğutulacak su, su dağıtım sistemi ve fıskiyeler aracılığıyla kule içerisinde dolgu malzemesi üzerine dağıtılmaktadır. Dolgu malzemeleri büyük bir su yüzeyinin daha uzun bir süre atmosferik havaya temas etmesine olanak tanımaktadır. Dolgu malzemeleri, soğutulacak suyun ve ortam havasının karakteristiklerine göre sıçratma tipi, film tipi ya da trickle gibi çeşitli şekillerde kullanılabilmektedir. Hava akımı fanlar aracılığıyla sağlanabildiği gibi, yoğunluk farkının neden olduğu kaldırma kuvveti ya da su püskürtmesinin indüksiyon etkisiyle de sağlanabilmektedir. Havanın nem içeriğinin su sıcaklığındaki doymuş nem içeriğinden az olması nedeniyle suyun küçük bir miktarı buharlaşmaktadır. Bu buharlaşma işlemi suyu sıvı halden buhar haline dönüştürmek için bir enerji gerektirmekte ve su soğutulmaktadır [17].

Soğutma kuleleri, ısı ve kütle transferi kombinasyonu ile suyu soğutmaktadır. Tipik tasarım koşullarında buharlaşma hızı, her 7 K su sıcaklık aralığı için su debisinin yaklaşık %1'idir. Bununla birlikte işletme sezonu boyunca buharlaşma hızı tasarım hızından daha düşüktür çünkü toplam ısı transferinin duyulur bileşeni giren havanın sıcaklığı düştükçe artmaktadır. Buharlaşmadan kaynaklanan su kaybına ek olarak boşaltım havası ile sürüklenme ve kabul edilebilir su kalitesini korumak için blöf nedeniyle de su kayıpları meydana gelmektedir [16].

Soğutma kuleleri suyu teorik olarak ortam havasının yaş termometre sıcaklığına kadar soğutabilmektedirler. Kuru tip ısı değiştiricilerine göre avantajlarından biri budur [8]. Fakat soğutma kulelerinde buharlaşmalı soğutma prosesinde

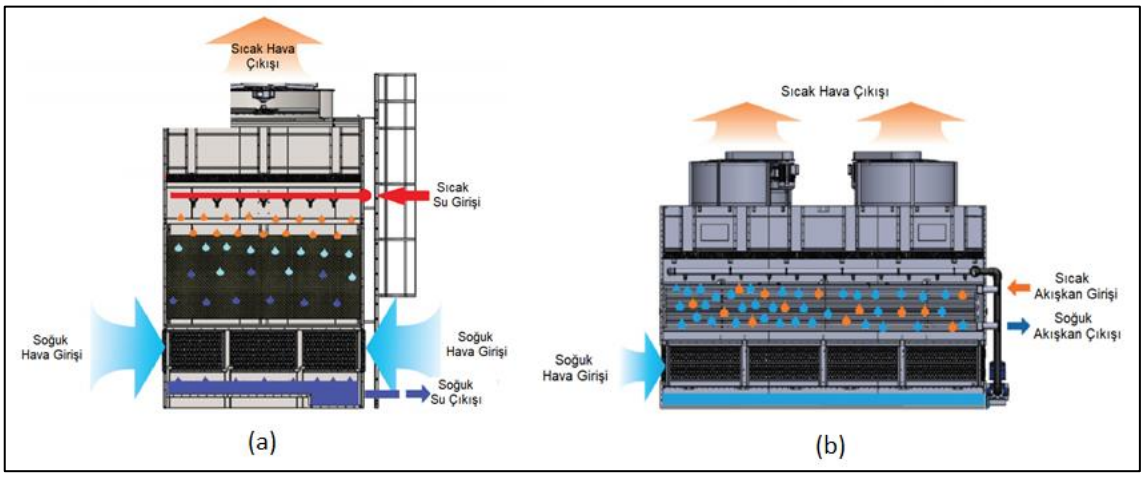
verimsizlikler olması nedeniyle yaş termometre sıcaklığına ancak belirli sıcaklıklar dâhilinde yaklaşılabilmektedir [18].

3.1 Soğutma Kulesi Tipleri

Soğutma kuleleri hava ve suyun temas durumuna göre, hava akımının türüne göre ve hava akımının akış yönüne göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilmektedir.

3.1.1 Temas Durumuna Göre

Doğrudan temaslı ya da açık çevrim (ıslak tip) soğutma kuleleri ve dolaylı temaslı ya da kapalı devre soğutma kuleleri olmak üzere iki temel tip buharlaştırmalı soğutma cihazı kullanılmaktadır. Açık çevrim soğutma kulelerinde, soğutulacak su dolgular aracılığıyla direkt olarak soğutma havasına maruz bırakılmakta ve böylece ısı yükü doğrudan havaya transfer edilmektedir. Kapalı devre soğutma kuleleri ise, suyun ısı değiştirici boruları üzerinden geçerken atmosferik havaya maruz kaldığı bir dış devre ve soğutulacak akışkanın ısı değiştirici borularının içinde dolaştığı bir iç devre olmak üzere iki ayrı akışkan devresi içermektedir (Şekil 3.1) [16].



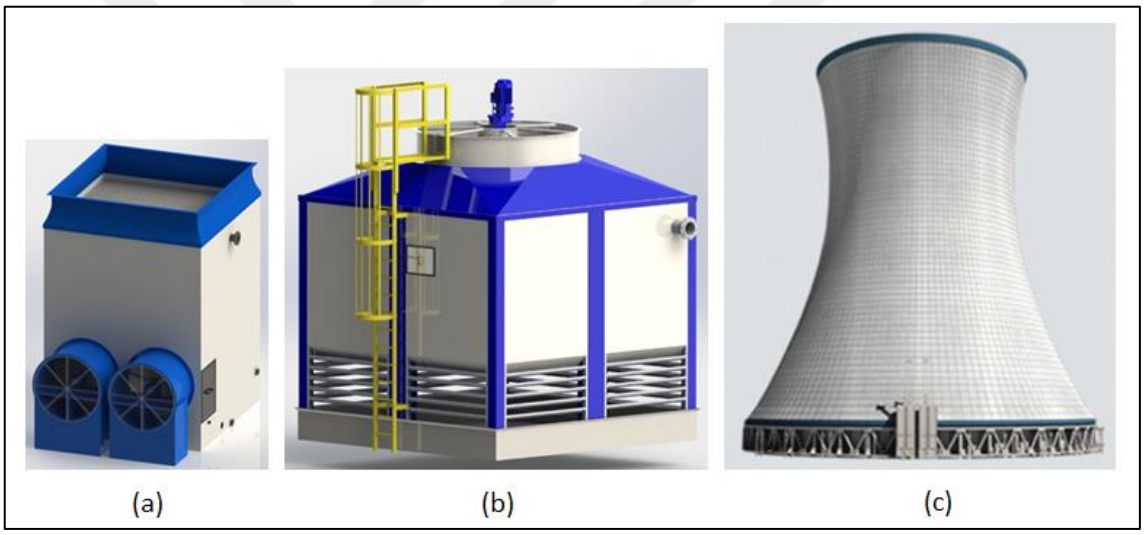
Şekil 3.1 Islak Tip (a) ve Kapalı Çevrim (b) Soğutma Kuleleri [19, 20]

3.1.2 Hava Akımının Türüne Göre

Temel olarak cebri çekişli/itişli kuleler ile doğal çekişli kuleler olarak sınıflandırılmaktadırlar.

Cebri çekişli/itişli kulelerde hava akımı fanlar yardımıyla oluşturulmaktadır. Fanlar basınç ihtiyacına, izin verilen ses seviyelerine ve enerji kullanım gereksinimlerine göre santrifüj veya eksenel tipte olabilmektedir. Fanlar giriş havası tarafında konumlandırılmışsa cebri itişli kuleler, çıkış havası tarafında konumlandırılmışsa cebri çekişli kuleler olarak isimlendirilmektedirler (Şekil 3.2). Su akımı aşağı yönlü olurken, hava akımı yukarı yönlü (karşı akışlı) veya yatay yönlü (çapraz akışlı) olabilmektedir [16].

Doğal çekişli kuleler çoğunlukla büyük güç üretim tesislerinde kullanılmaktadırlar. Isı transfer yöntemi karşı akış, çapraz akış ya da paralel akış şeklinde olabilmektedir. Hava akımı, ısınmış ve nemlenmiş daha hafif soğutma kulesi çıkış havası ile ortam havası arasındaki yoğunluk farkı etkisiyle sağlanmaktadır (Şekil 3.2) [16].



Şekil 3.2 Cebri İtişli (a), Cebri Çekişli (b) [21] ve Doğal Çekişli (c) Soğutma Kuleleri

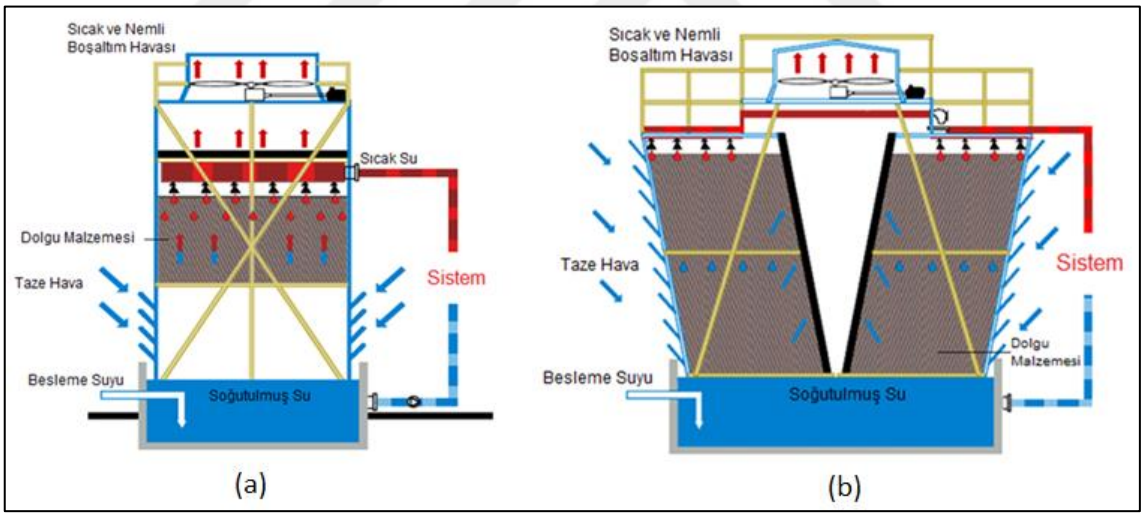
3.1.3 Hava Akımının Yönüne Göre

Karşı akışlı kuleler ve çapraz akışlı kuleler olmak üzere iki temel tiptedirler.

Karşı akışlı soğutma kulelerinde su; yerçekimi etkisiyle aşağı yönde akarken, hava akımı ise yukarı yönde hareket etmektedir (Şekil 3.3). Hava kulenin alt kısmındaki hava giriş panjurlarından kuleye girip, 90 ° dönmekte ve hava ile su arasında ısı ve kütle transferinin gerçekleştiği dolgu bölümünden yukarı doğru geçmektedir. Bu tip kulelerde çoğunlukla küçük bir hacimde etkili bir soğutma kapasitesi sağlayan

film tipi dolgu malzemeleri kullanılmaktadır [18]. Karşı akışlı bir soğutma kulesinde en kuru hava en soğuk su ile temas etmekte ve çapraz akışlı kulelerden daha iyi bir performans göstermektedirler. Çapraz akışlı kulelere kıyasla daha az bir oturma alanı fakat daha yüksek bir pompalama gücü gerektirmektedirler [22].

Çapraz akışlı kuleler, suyun aşağı yönde düşerken hava akımının yatay yönde olduğu dolgu konfigürasyonuna sahiptirler. Hava akımı kule panjurlarından içeri girip, yön değiştirmeden dolgu ve damla tutuculardan geçerek merkezi hava plenumuna gelmekte ve buradan da bir fan yardımıyla dışarı atılmaktadır (Şekil 3.3). Genellikle düşen su akımını küçük damlacıklar haline getirmeye olanak veren çubuk tipi sıçratma dolgular kullanılmakta ve şaşırtmalı olarak dizilmektedirler. Son yıllarda karşı akışlı kulelerde kullanılanlara benzer film tipi dolgu levhaları kullanılan yeni çapraz akış dolguları geliştirilmiştir [18]. Karşı akışlı kulelere kıyasla daha büyük bir hava giriş açıklığı bulundurmaktadırlar. Bu sebeple resirkülasyon gerçekleşme ihtimali daha yüksektir. Hava tarafında daha düşük bir basınç kaybı ve fan gücü gerektirmektedirler [22].



Şekil 3.3 Karşı Akışlı (a) ve Çapraz Akışlı (b) Soğutma Kuleleri

3.2 Soğutma Kulesi Terminolojisi

- Kuru Termometre Sıcaklığı

Havanın, içindeki su buharı ve radyasyonun etkisi olmaksızın ölçülen sıcaklığıdır. Termometre vb. ile okunan sıcaklık değeridir.

- Yaş Termometre Sıcaklığı

Soğutma kulesi tasarımındaki en önemli değişkendir. Aynı sıcaklıktaki sıvı suyun buharlaştırılmasıyla havanın adyabatik olarak soğutulabileceği doyma sıcaklığıdır. Bu nedenle sirküle edilen suyun kulede teorik olarak soğutulabileceği en düşük sıcaklığı temsil etmektedir. Fakat soğutma kulelerinde buharlaşmalı soğutma prosesinde verimsizlikler olması nedeniyle yaş termometre sıcaklığına ancak belirli sıcaklıklar dâhilinde yaklaşılabilmektedir [18].

- Bağıl Nem

Havanın içerdiği su buharı miktarının (m_v), aynı sıcaklıktaki havada bulunabilecek en fazla su buharı miktarına (m_g) oranı olup, ϕ ile gösterilmektedir. Havanın bağıl nemi $0 < \phi < 1$ arasında değişkenlik göstermektedir [23].

$$\Phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g} \tag{3.1}$$

- Özgül Nem

Birim kuru hava kütlesinde bulunan su buharı miktarı olup, ω ile gösterilmektedir.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \tag{3.2}$$

Ya da P toplam basınç olmak üzere,

$$\omega = \frac{0{,}622 P_v}{P - P_v} \tag{3.3}$$

şeklinde ifade edilebilmektedir [23].

- Sıcaklık Aralığı

Kule giriş suyu ile kule çıkış suyu arasındaki sıcaklık farkıdır.

- Yaklaşım

Soğutma kulesi çıkış suyu sıcaklığı ile kuleye giren ortam havasının yaş termometre sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkıdır.

3.3 Soğutma Kulesi Bileşenleri

Soğutma kuleleri; fan, elektrik motoru, damla tutucu, sıcak su dağıtım sistemi ve fıskiyeler, dolgu malzemesi, ana gövde ve su havuzu olmak üzere 6 ana bileşenden oluşmaktadır.

3.3.1 Fan

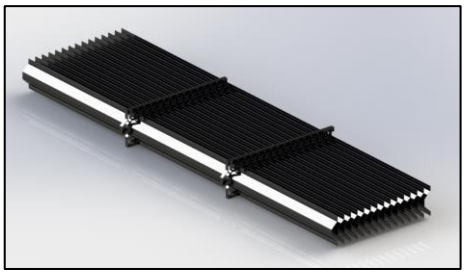
Elektrik motorundan aldığı güç ile kulede hava akımını sağlayan ekipmandır. Fanlar basınç ihtiyacına, izin verilen ses seviyelerine ve enerji kullanım gereksinimlerine göre santrifüj veya eksenel tipte olabilmektedir [16]. Genellikle alüminyum profil kanatlı ya da kompozit kanatlı fanlar kullanılmaktadır. Fan göbekleri, kanat ağırlığı ve yüklenmesi ile yapısal olarak uyumlu bir malzemeden yapılmış olmalıdır. Fanlar, statik ve dinamik balanslanmış olarak çalıştırılmalıdır [18].

3.3.2 Elektrik Motoru

Kulelerde elektrik enerjisini mil gücüne dönüştüren ekipmandır. Soğutma kulelerinde çoğunlukla 3 fazlı asenkron motorlar kullanılmaktadır. Enerji verimliliği açısından motorların frekans invertörüyle sürülmesi büyük bir önem arz etmektedir.

3.3.3 Damla Tutucular

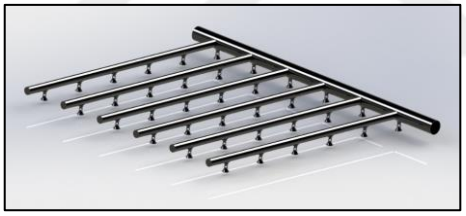
Damla tutucuların işlevi yüksek bir hava tarafı basınç düşümü yaratmaksızın, hava akımı ile sürüklenen su damlacıklarının kule çıkış havası ile kaçmasını engellemektir. Genellikle hava akımının geçerken yaptığı yön değiştirme sayısı ya da levha şekillerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Çoğunlukla sinüsoidal ya da hücresel tip olarak kullanılmaktadırlar. İhtiyaca göre PVC, ABS ya da PP malzemeden imal edilmektedirler [18].



Şekil 3.4 Damla Tutucu [21]

3.3.4 Sıcak Su Dağıtım Sistemi ve Fıskiyeler

Temel fonksiyonları kuleye giren sıcak suyun dolgu malzemesi üzerine homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktır. Karşı akışlı ve çapraz akışlı kuleler farklı tasarımlarda su dağıtım sistemlerine sahiptirler. Çapraz akışlı bir kulede sıcak su, dolgu malzemesi üzerinde bulunan su dağıtım havuzundan yerçekimi etkisiyle aşağı yönde düşmektedir. Karşı akışlı kulelerde ise kapalı boru ve fıskiye sistemleri kullanılmaktadır. İhtiyaca göre PVC, PP ya da CTP malzemeden imal edilebilmektedirler. Dolgu üzerinde homojen bir su dağılımı, soğutma kulesi performansı açısından son derece önemlidir [18].



Şekil 3.5 Sıcak Su Dağıtım Sistemi [21]

3.3.5 Dolgu Malzemesi

Temel fonksiyonları hava akımı ve su akımı arasındaki temas yüzeyini ve süresini arttırarak dolaşımdaki sudan ısı atımını hızlandırmaktır. Bu sebeple soğutma kulesi performansını doğrudan etkilemektedir. Verimli bir şekilde çalışması için, yüksek oranda bir ısı aktarımı sağlaması, hava akımına karşı düşük bir direnç göstermesi ve kule boyunca homojen bir su ve hava dağılımı sağlaması gerekmektedir. İdeal bir dolgu, bozulmaya karşı yüksek dirençli olmalı, orta derecede buz yüklenmesine dayanabilmeli ve uzun yıllar boyunca verimli ısı transfer yeteneğini koruyabilmelidir [18].

Dolgu malzemeleri, çok farklı çeşitlerde olabileceği ve farklı malzemelerden imal edilebileceği gibi günümüzde en çok PVC film tipi olanları kullanılmaktadır. Bununla birlikte suyun ve ortam havasının karakteristiklerine göre sıçratma tipi ya da trickle dolgu malzemeleri de tercih edilmektedir.

- Sıçratma Tipi Dolgu

Bu dolgu malzemeleri kule boyunca düşen su kütlesini çok sayıda küçük damlacıklara parçalamak için tasarlanmışlardır. Soğutma havasına maruz kalan su yüzeyiyle birlikte iletim, taşınım, radyasyon ve buharlaşma ile hava akımına aktarılan ısı miktarı da artmaktadır. Su dolgu malzemesi boyunca düşerken damlacıklar, yeni damlacıkların oluşumu nedeniyle su ve ısının yeniden dağılımına neden olan ard arda gelen sıçratma çubukları ile çarpışmaktadır. Bu sayede kule boyunca düşen suyun tutulma süresi uzamaktadır. Bu dolgunun doğası gereği dezavantajı su akışını kırması için büyük bir hacim dolayısıyla büyük bir kule gerektirmesidir. Film tipi dolgu malzemelerine göre daha yüksek bir pompalama gücü gerektirmektedirler [17].

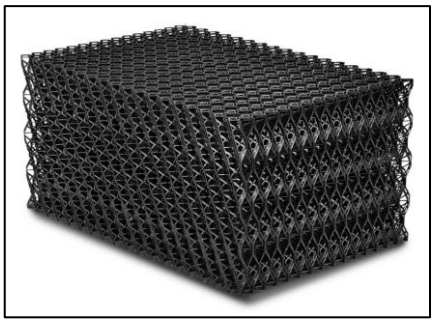
Sıçratma tipi dolgunun etkinliği damlacıklar oluşturma kabiliyetine ve hava akımına karşı göstereceği dirence bağlıdır. Çoğunlukla enjeksiyon yöntemiyle PP malzemeden imal edilmektedirler [17].



Şekil 3.6 Sıçratma Tipi Dolgu

- Trickle Tipi Dolgu

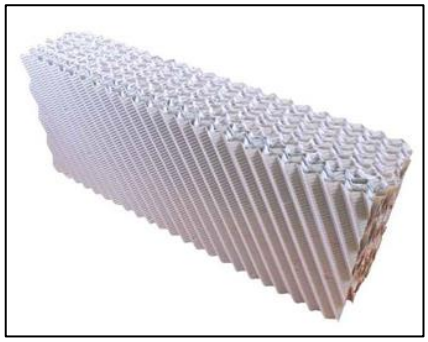
Trickle dolgu malzemeleri sıçratma tipi dolgudan daha ince olmakla birlikte plastik veya metal örgüden yapılmaktadırlar. Su sıçrama yerine bir örgüden aşağı süzülmektedir. Sıçratma tipi dolgudan daha ince ağ örgüsü nedeniyle daha kolay tıkanma ve daha fazla hava tarafı basınç düşümü yaratması eğilimindedirler [17].



Şekil 3.7 Trickle Tipi Dolgu

- Film Tipi Dolgu

Damlacık oluşturma yerine suyun ince bir film tabakası halinde geniş bir dolgu yüzeyine yayılmasına olanak verir. Bu sebeple sıçratma tipi dolgudan oldukça farklıdır. Film dolgu levhaları çeşitli şekillerde birleştirilebilmektedirler. Çoğunlukla ısıl şekillendirilmiş kıvrımlı PVC levhalar tercih edilmekte ve çapraz oluklu olarak birbirlerine birleştirilmektedirler. Yüksek ısı transfer katsayılarına ve düşük hava tarafı basınç kayıplarına sahiptirler. Homojen olmayan su dağılımı bu dolgu malzemesinin etkinliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Kirlenme bu dolgu malzemesi için sıçratma tipi dolgu malzemesine göre daha büyük sorun oluşturmaktadır. Çoğunlukla temiz su ve temiz ortam havası uygulamaları için tercih edilmektedirler [17].



Şekil 3.8 Film Tipi Dolgu [21]

3.3.6 Ana Gövde

Soğutma kulesi ana gövde malzemeleri için çoğunlukla korozyon direnci yüksek ve atmosferik koşullara dayanıklı malzemeler tercih edilmektedir. Günümüzde cam elyaf takviyeli polyester, paslanmaz çelik ve galvanizli çelik başlıca tercih edilen

malzemelerdendir. Birleştirme işlemleri için paslanmaz cıvata-somunlar tercih edilmektedir.

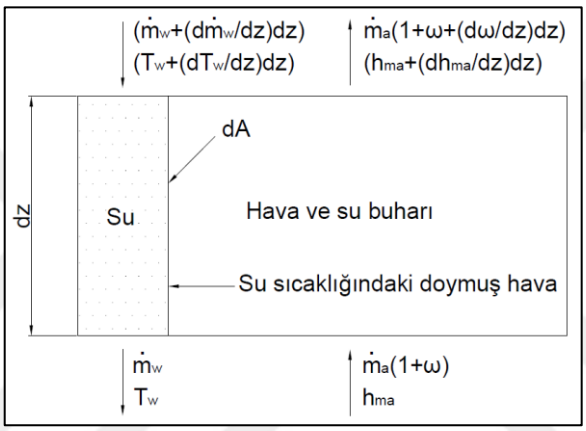
3.3.7 Su Havuzu

Soğutma kulelerinde soğutulmuş suyun toplandığı bölümdür. Çoğunlukla CTP, paslanmaz çelik ya da galvanizli çelik malzemeden imal edilmektedirler. Sızdırmazlık büyük bir önem arz etmektedir.

4
Teorik İnceleme

4.1 Açık Çevrim Soğutma Kulelerinde Isı ve Kütle Transferi

Aşağı yönlü akan suyun buharlaşması, havanın su buharı ile doymuş olduğu bir hava-su arayüzeyinde gerçekleşmektedir. Ardından buhar, daha az buhar konsantrasyonuna sahip serbest hava akımına transfer olmaktadır (Şekil 4.1) [17].



Şekil 4.1 Karşı Akışlı Dolgu Malzemesi için Kontrol Hacmi [17]

Arayüzey sıcaklığı T_i'nin yığın su sıcaklığı ,T_w, ile aynı olduğu varsayılmaktadır. Yatay her kesitte hava ve su özelliklerinin sabit olduğu ve ısı ve kütle transferi için dA alanının aynı olduğu kabul edilmektedir [17].

Kontrol hacmi için kütle dengesi,

$$\dot{m}_a(1+\omega) + \left(\dot{m}_w + \frac{d\dot{m}_w}{dz}dz\right) = \dot{m}_a\left[1 + \left(\omega + \frac{d\omega}{dz}dz\right)\right] + \dot{m}_w \tag{4.1}$$

ya da,

$$\frac{d\dot{m}_w}{dz} = \dot{m}_a\frac{d\omega}{dz} \tag{4.2}$$

olmaktadır [17].

Kontrol hacmi için enerji dengesi,

$$\dot{m}_a h_{ma} + \left(\dot{m}_w + \frac{d\dot{m}_w}{dz}dz\right) c_{pw} \left(T_w + \frac{dT_w}{dz}dz\right) = \dot{m}_a \left(h_{ma} + \frac{dh_{ma}}{dz}dz\right) + \dot{m}_w c_{pw} T_w \tag{4.3}$$

şeklinde yazılmaktadır. Bu denklemde T_w, °C birimindedir. İkinci dereceden terimlerin ihmal edilmesiyle Denklem 4.3,

$$\dot{m}_w c_{pw} \frac{dT_w}{dz} + c_{pw} T_w \frac{d\dot{m}_w}{dz} = \dot{m}_a \frac{dh_{ma}}{dz} \tag{4.4}$$

şeklinde basitleşmektedir. Burada h_{ma}, birim kuru hava kütlesi için hava-su buharı karışımının entalpi değeridir ve Denklem 4.5 ile hesaplanmaktadır [17].

$$h_{ma} = c_{pa} T_a + \omega\left(h_{fgwo} + c_{pv} T_a\right) \tag{4.5}$$

Burada h_{fgwo}, 0 °C; c_{pa} ve c_{pv}, $T_a/2$ °C sıcaklıklarında değerlendirilmektedir.

Denklem 4.2'nin, Denklem 4.4'te yerine koyulmasıyla,

$$\frac{dT_w}{dz} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w}\left(\frac{1}{c_{pw}}\frac{dh_{ma}}{dz} - T_w \frac{d\omega}{dz}\right) \tag{4.6}$$

bulunmaktadır [17].

Hava-su arayüzeyindeki toplam enerji transferi, buhar konsantrasyonundaki fark nedeniyle kütle transferi ve sıcaklık farkı nedeniyle ısı transferiyle ilişkili enerji transferlerinden oluşmaktadır [17].

$$d\dot{Q} = d\dot{Q}_m + d\dot{Q}_c \tag{4.7}$$

Burada m ve c alt simgeleri sırasıyla kütlesel ve taşınımsal ısı transferini ifade etmektedir.

Arayüzeydeki kütle transferi Denklem 4.8 ile ifade edilmektedir [17].

$$\frac{d\dot{m}_w}{dz}\,dz = h_d(\omega_{sw} - \omega)dA \tag{4.8}$$

Burada ω_{sw}, havanın yerel yığın su sıcaklığı T_w'de değerlendirilen doygunluk mutlak nem değeridir.

Enerji transferi,

$$d\dot{Q}_m = h_v \frac{d\dot{m}_w}{dz}\,dz = h_v h_d(\omega_{sw} - \omega)dA \tag{4.9}$$

olmaktadır [17].

Yığın su sıcaklığı T_w'deki su buharının entalpisi h_v Denklem 4.10 ile verilmektedir [17].

$$h_v = h_{fgwo} + c_{pv}T_w \tag{4.10}$$

Burada T_w, °C birimindedir ve c_{pv}, $T_w/2$ °C sıcaklığında değerlendirilmektedir.

Duyulur ısının arayüzeydeki taşınım ısı transferi,

$$d\dot{Q}_c = h_c(T_w - T_a)dA \tag{4.11}$$

ile ifade edilmektedir [17].

Yerel yığın su sıcaklığında değerlendirilen doymuş havanın entalpisi Denklem 4.12 ile verilmektedir [17].

$$h_{masw} = c_{pa}T_w + \omega_{sw}\left(h_{fgwo} + c_{pv}T_w\right) = c_{pa}T_w + \omega_{sw}h_v \tag{4.12}$$

Denklem 4.12'nin yeniden düzenlenmesiyle,

$$h_{masw} = c_{pa}T_w + \omega h_v + (\omega_{sw} - \omega)h_v \tag{4.13}$$

elde edilmektedir. Burada c_{pa}, $T_w/2$ °C sıcaklığında değerlendirilmektedir [17].

Denklem 4.5, Denklem 4.13'ten çıkarılır ve farklı sıcaklıklarda değerlendirilen özgül ısılardaki küçük farklılıklar ihmal edilirse sonuç denklemi aşağıdaki şekilde basitleştirilebilmektedir [17].

$$h_{masw} - h_{ma} \approx \left(c_{pa} + \omega c_{pv}\right)(T_w - T_a) + (\omega_{sw} - \omega)h_v \tag{4.14}$$

ya da,

$$T_w - T_a = \frac{[(h_{masw} - h_{ma}) - (\omega_{sw} - \omega)h_v]}{c_{pma}} \tag{4.15}$$

olmaktadır. Burada c_{pma} Denklem 4.16 ile hesaplanmaktadır.

$$c_{pma} = c_{pa} + \omega c_{pv} \tag{4.16}$$

Denklem 4.9, Denklem 4.11 ve Denklem 4.15; Denklem 4.7'de yerine koyulur ve yeniden düzenlenirse,

$$d\dot{Q} = h_d \left[\frac{h_c}{c_{pma}h_d}(h_{masw} - h_{ma}) + \left(1 - \frac{h_c}{c_{pma}h_d}\right)h_v(\omega_{sw} - \omega)\right] dA \tag{4.17}$$

elde edilmektedir. Burada $h_c/(c_{pma}h_d)$, Lewis faktörü (Le_f) olarak bilinmekte ve buharlaşmalı bir proseste ısı ve kütle transferlerinin bağıl oranını ifade etmektedir [17].

Bosnjakovic, hava-su buharı sistemlerinde Lewis faktörünü ifade etmek için Denklem 4.18'i önermiştir [17].

$$Le_f = 0{,}866^{0{,}667}\left(\frac{\omega_{sw} + 0{,}622}{\omega + 0{,}622} - 1\right)/ln\left(\frac{\omega_{sw} + 0{,}622}{\omega + 0{,}622}\right) \tag{4.18}$$

Enerji transferi, hava akımının enerji değişimine eşit olmalıdır. Bu durumda Denklem 4.17,

$$\frac{dh_{ma}}{dz} = \frac{1}{\dot{m}_a}\frac{d\dot{Q}}{dz} = \frac{h_d}{\dot{m}_a}\frac{dA}{dz}\left[Le_f(h_{masw} - h_{ma}) + (1 - Le_f)h_v(\omega_{sw} - \omega)\right] \tag{4.19}$$

halini almaktadır [17].

Isı ve kütle transferi için uygun alanın dolgu boyunca yatay her kesitte aynı olduğu soğutma kulesi dolgu malzemesinin bir boyutlu modeli için transfer alanı, genellikle dz derinliği için Denklem 4.20 ile verilmektedir [17].

$$dA = a_{fi} A_{fr} dz \tag{4.20}$$

Burada a_{fi}, ıslak alanın dolgu hacmine oranı ya da alan yoğunluğu; A_{fr} dolgu ön yüz alanıdır.

Denklem 4.20'nin, Denklem 4.19'da yerine koyulmasıyla,

$$\frac{dh_{ma}}{dz} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr}}{\dot{m}_a} \left[Le_f (h_{masw} - h_{ma}) + (1 - Le_f) h_v (\omega_{sw} - \omega) \right] \tag{4.21}$$

elde edilmektedir [17].

Çevre nemi yeterince yüksekse, hava dolguyu terk etmeden once su buharı ile doymuş hale gelmektedir. Bu durumda, önceki denklemler dolgudaki buharlaşma prosesini tanımlamak için yetersiz olacaktır. Çünkü arayüzeydeki doymuş havanın sıcaklığı, yeni doymuş serbest hava akımının sıcaklığından hâlâ yüksek olacak ve ısı ve kütle transferi için bir potansiyel hâlâ var olacaktır. Serbest hava akımına transfer olan fazlalık su buharı sis olarak yoğuşacaktır [17].

Sis bölgesi için ısı ve kütle transfer katsayılarının Bourillot, Poppe ve Rögener tarafından önerildiği gibi doymamış havanınkiler ile aynı olduğu varsayılırsa, sis bölgesindeki buharlaşma hızı, arayüzeyde yerel yığın su sıcaklığındaki doymuş havanın nem içeriği ve serbest hava akımının nem içeriğindeki farka bağlıdır [17].

$$\frac{d\dot{m}_w}{dz} = h_d a_{fi} A_{fr} (\omega_{sw} - \omega_{sa}) \tag{4.22}$$

Burada ω_{sa}, T_a sıcaklığındaki doymuş havanın mutlak nem değeridir.

Fazlalık su buharı yoğuşacağı için, aşırı doymuş havanın entalpisi Denklem 4.23 ile ifade edilmektedir [17].

$$h_{ss} = c_{pa}T_a + \omega_{sa}\left(h_{fgwo} + c_{pv}T_a\right) + (\omega - \omega_{sa})c_{pw}T_a \tag{4.23}$$

Doymamış hava durumundaki gibi aynı şekilde devam edilirse,

$$\frac{dh_{ma}}{dz} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr}}{\dot{m}_a}\left[Le_f(h_{masw} - h_{ss}) + \left(1 - Le_f\right)h_v(\omega_{sw} - \omega_{sa}) + Le_f(\omega - \omega_{sa})c_{pw}T_w\right] \tag{4.24}$$

bulunmaktadır [17].

Daha önce belirtilen kabullere ek olarak Merkel, Lewis faktörünün bire eşit olduğunu ve buharlaşma kaybının ihmal edilebilir olduğunu kabul etmektedir. Bu iki kabul ile Denklem 4.21 ve Denklem 4.6 sırasıyla,

$$\frac{dh_{ma}}{dz} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr}}{\dot{m}_a}(h_{masw} - h_{ma}) \tag{4.25}$$

$$\frac{dT_w}{dz} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w}\frac{1}{c_{pw}}\frac{dh_{ma}}{dz} \tag{4.26}$$

şeklinde basitleşmektedir [17].

Sadece verilen bu denklemler ile dolguyu terk eden havanın hâlini hesaplamak mümkün değildir, çünkü bu hesaplama için en az iki özelik bilinmesi gerekmektedir. Merkel, dolgudan ayrılan havanın su buharı ile doymuş olduğunu kabul etmektedir. Bu yaklaşım çoğu uygulamada kabul edilebilir sonuçlar vermektedir [17].

İntegral işlemi için Denklem 4.25 ve Denklem 4.26 birleştirilirse,

$$\frac{h_d A}{\dot{m}_w} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr} L_{fi}}{\dot{m}_w} = \frac{h_d a_{fi} L_{fi}}{G_w} = \int_{T_{wo}}^{T_{wi}} \frac{c_{pw} dT_w}{(h_{masw} - h_{ma})} = Me \tag{4.27}$$

elde edilmektedir [17].

Denklem 4.27 çoğunlukla Merkel Denklemi olarak bilinmektedir. Boyutsuz performans katsayısı ya da transfer karakteristiği $h_d a_{fi} L_{fi}/G_w$, Merkel Sayısı olarak

bilinmekte ve kulenin sudan ısı atma kabiliyetini ifade etmektedir. Bu denklemde L_{fi} dolgu malzemesinin yüksekliği ve $G_w = m_w/A_{fr}$'dir [17].

Literatürde Merkel Sayısı için genellikle KaV/L notasyonu kullanılmaktadır.

Burada,

$K = h_d$

$a = a_{fi}$

$V = A_{fr}L_{fi}$

$L = m_w$ olmaktadır [17].

Denklem 4.27 doğrudan matematiksel bir çözüme tabi değildir. Bir kuledeki herhangi bir noktadaki kütle ve enerji dengesini yansıtmaktadır ve iki akışkan akımının bağıl hareketinden bağımsızdır. Bu yüzden denklemler mekanik integrasyon teknikleri ile değerlendirilmeli ve prosedür bağıl hareketi hesaba katmalıdır [16].

Merkel Denklemi (Denklem 4.27)'nin çözümü için CTI (Cooling Technology Institute) 4 noktalı Chebyshev İntegrasyon Tekniğinin kullanılmasını önermektedir. Chebyshev metodu integral aralığı içinde önceden belirlenmiş noktalardaki integrand değerlerini kullanmaktadır. Böylece seçilen değerlerin toplamının sabit bir zaman aralığıyla çarpılması istenen yaklaşık integral değerini vermektedir. 4 noktalı Chebyshev integrasyon tekniğinin formülasyonu aşağıdaki gibidir [17]:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{(b-a)}{4}[f(x_1) + f(x_2) + f(x_3) + f(x_4)] \qquad (4.28)$$

$f(x_1)$: x = a + 0,1(b-a)'daki f(x) değeri

$f(x_2)$: x = a + 0,4(b-a)'daki f(x) değeri

$f(x_3)$: x = a + 0,6(b-a)'daki f(x) değeri

$f(x_4)$: x = a + 0,9(b-a)'daki f(x) değeri

Chebyshev tekniğinin Merkel Denklemine uygulanmasıyla,

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_{wo}}^{T_{wi}} \frac{c_{pw} dT_w}{(h_{masw} - h_{ma})} \approx \frac{c_{pwm}(T_{wi} - T_{wo})}{4} \left[\frac{1}{dh_1} + \frac{1}{dh_2} + \frac{1}{dh_3} + \frac{1}{dh_4}\right] \quad (4.29)$$

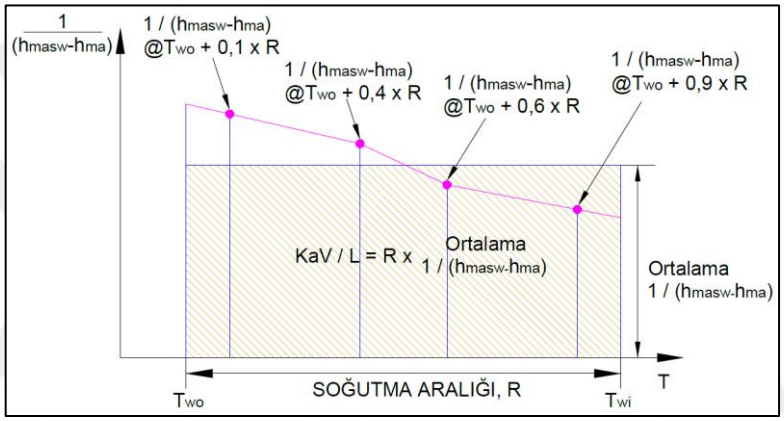
dh_1: T_{wo} + 0,1(T_{wi} - T_{wo}) sıcaklığındaki (h_{masw}-h_{ma}) değeri

dh_2: T_{wo} + 0,4(T_{wi} - T_{wo}) sıcaklığındaki (h_{masw}-h_{ma}) değeri

dh_3: T_{wo} + 0,6(T_{wi} - T_{wo}) sıcaklığındaki (h_{masw}-h_{ma}) değeri

dh_4: T_{wo} + 0,9(T_{wi} - T_{wo}) sıcaklığındaki (h_{masw}-h_{ma}) değeri

elde edilmektedir [17].



Şekil 4.2 Chebyshev Tekniği ile KaV/L İfadesi

Bir soğutma kulesi, çıkış suyu sıcaklığının yaş termometre sıcaklığına yaklaşımındaki değişiklikle birlikte çok çeşitli su debilerinde, hava debilerinde ve ısı yüklerinde çalışabilmektedir [16].

Soğutma kulesi uygulamalarında performans karakteristiğini (KaV/L), su ve hava debileri oranı (L/G) ile ilişkilendiren çeşitli korelasyonlar mevcuttur. Merkel Metodu kullanıldığı zaman performans karakteristiklerini Denklem 4.30 ile sunmak uygun olmaktadır [17].

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G}\right)^{-n} \quad (4.30)$$

C ve n sayıları deneysel olarak belirlenen performans karakteristik katsayılarıdır.

4.2 Açık Çevrim Soğutma Kulelerinde Hava Tarafı Basınç Düşümü

Bir soğutma kulesi dolgu malzemesinin basınç düşümü kayıp katsayısı, dolgu boyunca basınç düşümü ölçülerek belirlenmektedir. Bu ölçümlerin sonuçları, hava ve suyun kütlesel akılarının fonksiyonu olan deneysel bağıntılarla ilişkilendirilmektedir. Bu deneysel bağıntılar daha sonra soğutma kuleleri tasarımında kule boyunca çekişi belirlemek için kullanılmaktadır. Mekanik çekişli soğutma kuleleri için uygun fanlar büyük ölçüde dolgu kayıp katsayısına göre seçilmektedir. Bu nedenle dolgu kayıp katsayısının doğru ifade edilmesi önemlidir. Aksi halde soğutma kulesi tasarım koşullarını karşılamıyorsa, kayıp katsayılarının deneysel bağıntılarla yanlış ifade edilmesinin finansal etkileri olabilmektedir [7].

Birçok araştırmacı dolgu malzemesi basınç düşümü katsayısı üzerine çeşitli korelasyonlar sunmuşlardır. Literatürde dolgu boyunca gerçekleşen hava tarafı basınç düşümü katsayısı için yaygın olarak verilen korelasyonlardan biri Denklem 4.31 ile sunulmaktadır [17].

$$K_{dolgu} = C_1 {G_w}^{C_2} {G_a}^{C_3} \tag{4.31}$$

Burada C_1, C_2 ve C_3 dolgu malzemesi basınç düşümü katsayısı deneysel sabitleridir.

Dolgu malzemesi boyunca gerçekleşen hava tarafı basınç düşümü Denklem 4.32 ile verilmektedir [7].

$$\Delta P_{dolgu} = K_{dolgu} \frac{\rho_a {V_a}^2}{2} \tag{4.32}$$

4.3 Ekonomik Analiz

Genel olarak işletme maliyetleri gibi yıllık maliyetler sabit bir oran ile artmakta ya da azalmakta ve geometrik artan ya da azalan bir ödemeler serisini temsil etmektedir. Denklem 4.33 ya da Denklem 4.34 ile geometrik değişen serinin bugünkü değer faktörü hesaplanmaktadır. Ardından Denklem 4.35 ile geometrik değişen serinin bugünkü değeri belirlenmektedir.

g ≠ i ise,

$$\left(\frac{P}{A_1}, g, i, n\right) = \frac{1 - \left(\frac{1+g}{1+i}\right)^n}{i - g} \tag{4.33}$$

g = i ise,

$$\left(\frac{P}{A_1}, g, i, n\right) = \frac{n}{1+i} \tag{4.34}$$

$$BD = A_1 * \left(\frac{P}{A_1}, g, i, n\right) \tag{4.35}$$

5
Deneysel Çalışmalar

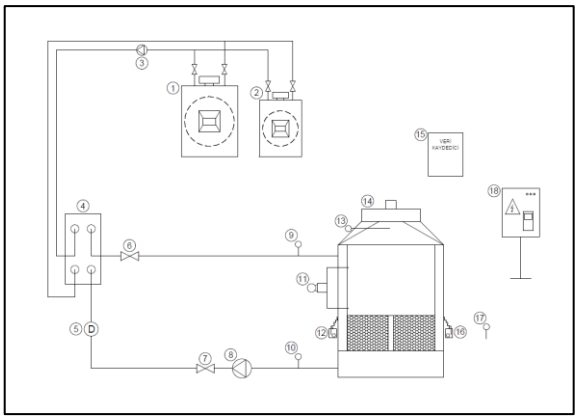
5.1 Deney Tesisatı

Bu tez çalışmasında testler, Niba Su Soğutma Kuleleri San. ve Tic. A.Ş. fabrikası Ar-Ge test alanında bulunan gerçek boyutlarındaki bir HMP(8x8) model açık çevrim soğutma kulesinde gerçekleştirilmiştir. Deney tesisatı genel görünüşü Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Soğutma Kulesi Test Düzeneği

Test düzeneği, sahip olduğu frekans invertörü ve boru hattına konumlandırılmış çeşitli akış kontrol vanaları ile kuleden geçirilen hava ve su debilerinin değiştirilmesine olanak tanımaktadır. Soğutma kulesine ısı yükü birbirine paralel bağlanmış iki adet gaz yakıtlı sıcak su kazanı tarafından sağlanmaktadır. Şekil 5.2'de soğutma kulesi test düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Soğutma Kulesi Test Düzeneği (Şematik)

1- Gaz yakıtlı sıcak su kazanı 1

2- Gaz yakıtlı sıcak su kazanı 2

3- Kazan hattı su pompası

4- Plakalı ısı değiştiricisi

5- Debimetre: Sirkülasyon suyu debi ölçümü

6- Akış kontrol vanası 1

7- Akış kontrol vanası 2

8- Soğutma kulesi hattı su pompası

9- Sıcaklık ölçüm cihazı 1: Kule giriş suyu sıcaklığı ölçümü

10- Sıcaklık ölçüm cihazı 2: Kule çıkış suyu sıcaklığı ölçümü

11- Fark basınç ölçüm cihazı: Hava tarafı basınç düşümü ölçümü

12- Yaş termometre sıcaklık ölçüm cihazı 1

13- Sıcaklık ölçüm cihazı 3: Kule çıkış havası sıcaklık ölçümü

14- Soğutma kulesi

15- Veri kaydedici

16- Yaş termometre sıcaklık ölçüm cihazı 2

17- Sıcaklık ölçüm cihazı 4: Çevre havası kuru termometre sıcaklığı ölçümü

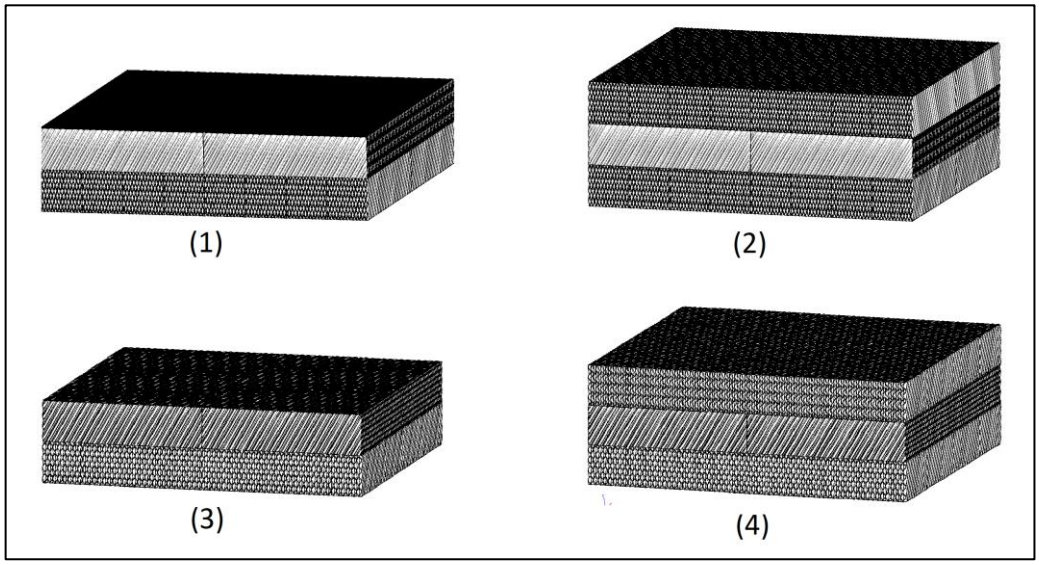
18- Frekans invertörlü elektrik panosu

Soğutma kulesi 2,4 m. x 2,4.m x 4,1 m. boyutlarındadır. Hava akımı 1500 mm. çaplı, 4 kanatlı, kulenin üst tarafına konumlandırılmış eksenel bir fan ile sağlanmaktadır. Fan; 7,5 kW, 750 d/d elektrik motoru ile direkt akuple olarak tahrik edilmektedir.

Test edilecek dolgu malzemesi paketleri, ısıl şekillendirilmiş, kıvrımlı PVC levhaların çapraz oluklu şekilde yapıştırılmasıyla elde edilmiştir. Her bir dolgu paketi 0,3 m. x 1,18 m. x 0,3 m. boyutlarında olup üst üste şaşırtmalı şekilde dizilmişlerdir. Testlerde performansları araştırılacak dolgu malzemelerinin özellikleri Tablo 5.1'de, genel görünüşleri Şekil 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.1 Test Edilecek Dolgu Malzemeleri Özellikleri

Dolgu Malzemesi	**Hatve (mm)**	**Yükseklik (mm)**	**Alan/Hacim yoğunluğu (m^2/m^3)**
Numune 1	12	600	242
Numune 2	12	900	242
Numune 3	19	600	150
Numune 4	19	900	150



Şekil 5.3 Numune 1 (1), Numune 2 (2), Numune 3 (3), Numune 4 (4) Genel Görünüş Resimleri

5.2 Deneysel Çalışmalar

Bu test çalışmalarında amaç 2 farklı hatve ve 2 farklı yükseklik değerine sahip PVC film tipi dolgu malzemelerinin, su ve havanın farklı debi ve sıcaklıklarında dolgu performans karakteristik katsayılarını ve basınç düşümü katsayısı deneysel sabitlerini elde etmektir. Bu amaçla; giriş havasının kuru termometre ve yaş termometre sıcaklıkları, çıkış havasının kuru termometre sıcaklığı, su giriş ve su çıkış sıcaklıkları, su debisi ve hava tarafı basınç düşümü verileri kayıt altına alınmıştır. Her bir test için sıcaklık değerleri 10 s. aralıklarla 1 saat süresince kayıt altına alınmıştır. Her bir test arasında sistemin yeniden rejime gelmesi için yeterince süre beklenilmiştir.

Her bir dolgu malzemesi, 4 farklı su debisi ve her bir su debisi için 3 farklı hava debisinde olmak üzere toplamda 12 farklı durum için test edilmiştir. Su debisinin değiştirilmesi boru hattına konumlandırılmış akış kontrol vanalarının çeşitli açıklıklarda çalıştırılmasıyla, hava debisinin değiştirilmesi ise frekans invertörü yardımıyla motorun farklı hızlarda çalıştırılmasıyla sağlanmıştır. Kuleden geçen hava debisi Denklem 4.26 ile hesaplanmıştır. Her bir dolgu malzemesi için deneysel parametreler Tablo 5.2, Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Numune 1 için Deneysel Parametreler

Dolgu Malzemesi	**Su Debisi (kg/s)**	**Teorik Hava Debisi (Denklem 4.26) (kg/s)**
Numune 1	33,33	14.87
		13.49
		11.35
	27,78	14,28
		13,05
		10,79

Tablo 5.2 Numune 1 için Deneysel Parametreler (Devamı)

Dolgu Malzemesi	Su Debisi (kg/s)	Teorik Hava Debisi (Denklem 4.26) (kg/s)
Numune 1	22,22	13.77
		12.78
		10.54
	16,67	12.88
		11.81
		9.88

Tablo 5.3 Numune 2 için Deneysel Parametreler

Dolgu Malzemesi	Su Debisi (kg/s)	Teorik Hava Debisi (Denklem 4.26) (kg/s)
Numune 2	33,33	14.01
		12.55
		10.34
	27,78	13.59
		12.21
		10.15
	22,22	13.25
		11.9
		9.84

Tablo 5.3 Numune 2 için Deneysel Parametreler (Devamı)

Dolgu Malzemesi	Su Debisi (kg/s)	Teorik Hava Debisi (Denklem 4.26) (kg/s)
Numune 2	16,67	12.27
		11.1
		9.27

Tablo 5.4 Numune 3 için Deneysel Parametreler

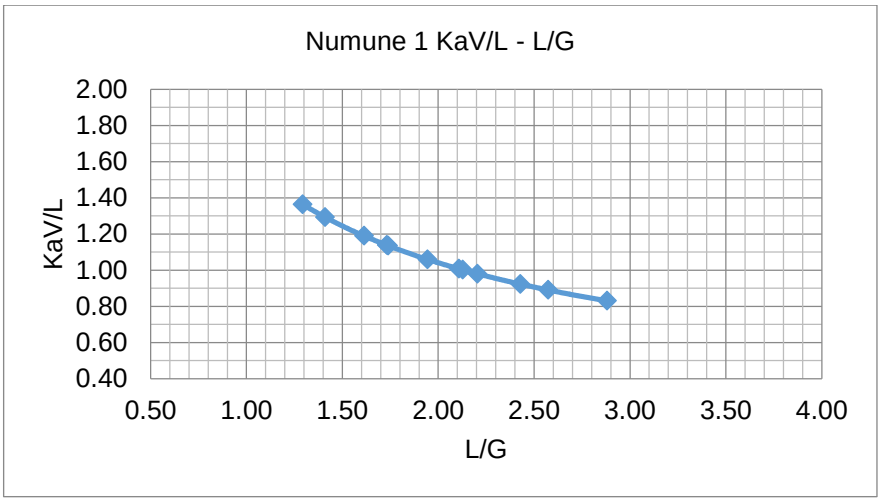
Dolgu Malzemesi	Su Debisi (kg/s)	Teorik Hava Debisi (Denklem 4.26) (kg/s)
Numune 3	33,33	15.06
		13.69
		10.98
	27,78	14.91
		13.39
		10.8
	22,22	14.66
		13.36
		10.69
	16,67	14.29
		12.52
		10.05

Tablo 5.5 Numune 4 için Deneysel Parametreler

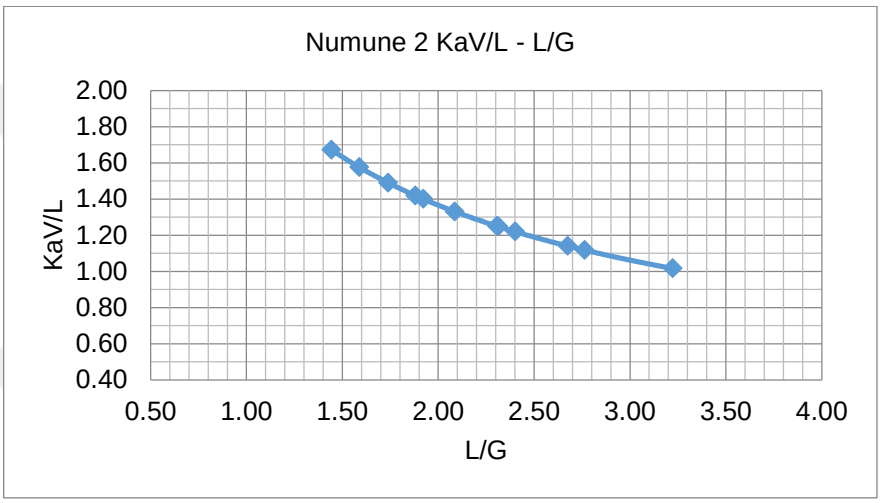
Dolgu Malzemesi	Su Debisi (kg/s)	Teorik Hava Debisi (Denklem 4.26) (kg/s)
Numune 4	33,33	14.61
		12.82
		10.44
	27,78	14.43
		12.7
		10.33
	22,22	14.16
		12.44
		10.1
	16,67	13.43
		11.47
		9.38

5.2.1 Deneysel Sonuçlar ve Analiz

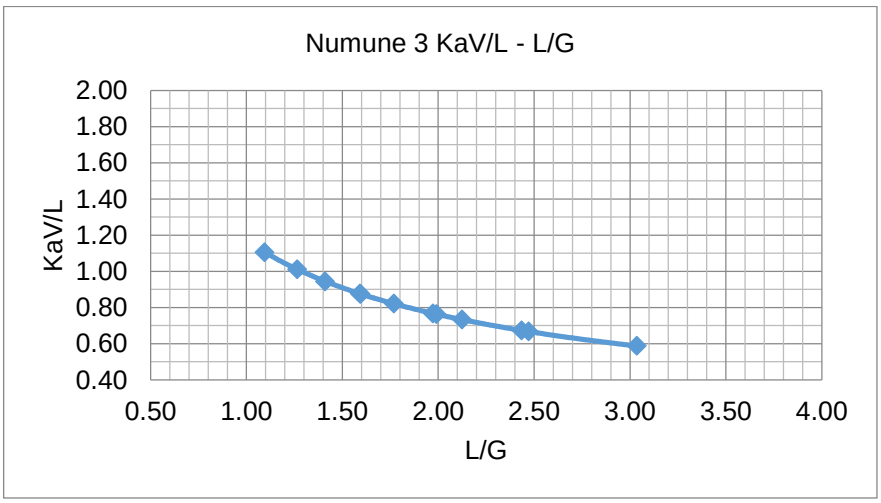
Gerçekleştirilen testlerden elde edilen veriler kullanılarak Numune 1, Numune 2, Numune 3 ve Numune 4 film tipi dolgu malzemelerinin karakteristik eğrileri (KaV/L – L/G) ve dolgu performans karakteristik katsayıları (Denklem 4.30, C ve n katsayıları) elde edilmiştir (Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7). Soğutma kulesi endüstrisinde bu karakteristik eğriler ve dolgu karakteristik katsayıları kullanılarak soğutma kulesi ısıl performansı kolaylıkla tahmin edilebilmektedir.



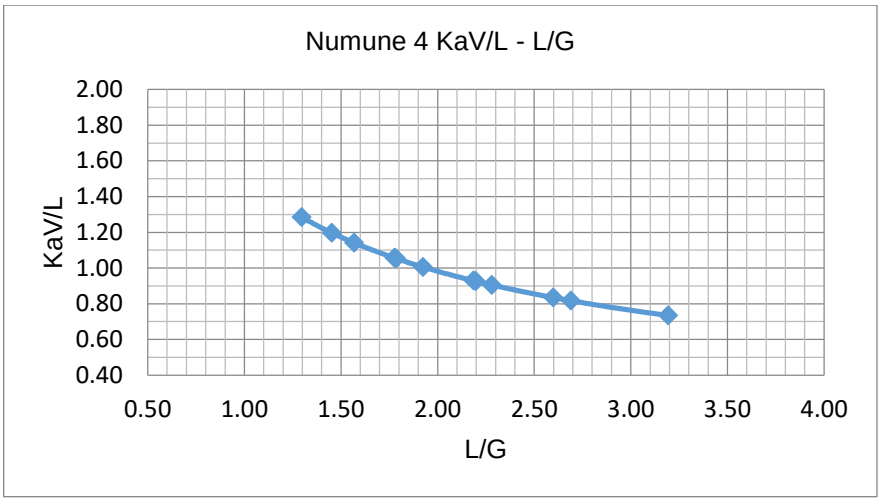
Şekil 5.4 Numune 1 KaV/L - L/G Eğrisi



Şekil 5.5 Numune 2 KaV/L - L/G Eğrisi

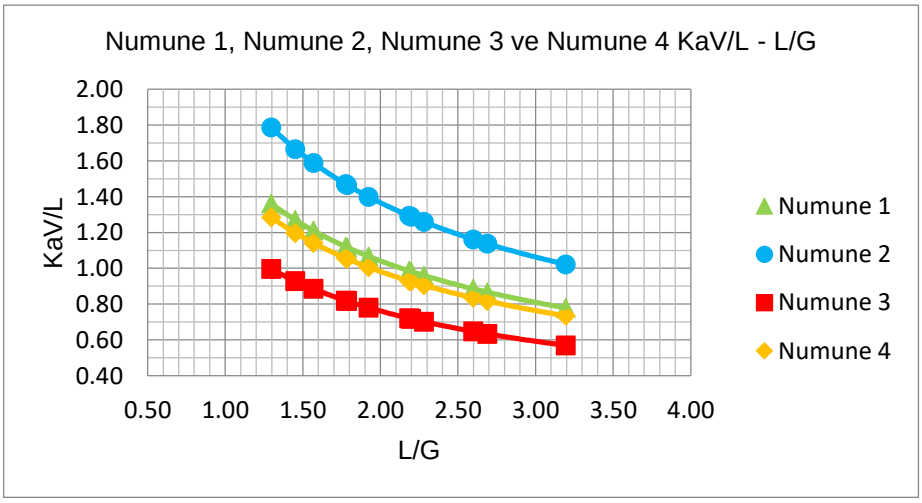


Şekil 5.6 Numune 3 KaV/L - L/G Eğrisi



Şekil 5.7 Numune 4 KaV/L - L/G Eğrisi

Şekil 5.8'de dolgu malzemelerinin karakteristik eğrileri aynı L/G değerleri için sunulmuştur. Bu grafikten hareketle, aynı L/G değerleri için daha yüksek KaV/L değerlerine sahip Numune 2 dolgu malzemesinin, diğer dolgu malzemelerine kıyasla daha yüksek bir soğutma yeteneğine sahip olduğu söylenebilmektedir. Daha düşük KaV/L değerlerine sahip Numune 3 dolgu malzemesi ise diğer dolgu malzemelerine kıyasla düşük bir ısıl performans sergilemektedir. Ayrıca Numune 1 ve Numune 4 dolgu malzemelerinin birbirlerine oldukça yakın KaV/L değerlerine sahip olması, bu iki dolgu malzemesinin yakın bir soğutma kabiliyetine sahip olduklarını göstermektedir. Buradan dolgu malzemelerinde yükseklik farkı nedeniyle meydana gelen soğutma yeteneğindeki iyileşmenin, daha dar hatveli dolgu malzemeleri kullanılarak telafi edilebileceği öngörülmektedir.



Şekil 5.8 Numune1, Numune 2, Numune 3 ve Numune 4 KaV/L - L/G Eğrileri

Gerçekleştirilen testlerde her bir dolgu malzemesi için ölçülen basınç düşümü değerleri kullanılarak doğrusal olmayan regresyon analiziyle, hava tarafı basınç düşümü katsayısı (Denklem 4.31) deneysel sabitleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen her bir analiz için S değeri < 2,5 olup, bu da yaklaşık %95 güvenilirliği ifade etmektedir.

Dolgu malzemelerinin aynı şartlar altında davranışlarını inceleyebilmek adına her bir dolgu malzemesi örnek bir durum için aynı başlangıç koşullarında, elde edilen dolgu performans karakteristik katsayıları ve basınç düşümü katsayısı deneysel sabitleri kullanılarak, hem eşit kule oturma alanı hem de dolgudaki eşit hava hızı değerleri için Merkel Metodu ile yeniden sınanmıştır. Bu sayede aynı soğutma performansı için dolgu malzemelerinin gerektirecekleri hava debisi ve neden olacakları hava tarafı basınç düşümü değerleri belirlenmiştir. Devamında elde edilen bu hava debisi ve basınç düşümü değerleri için bir fan seçimi yapılarak ihtiyaç duyacakları fan mil gücü değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.6 ve Tablo 5.7'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.6 Eşit Kule Oturma Alanında Karşılaştırma

Eşit Kule Oturma Alanında Karşılaştırma (Oturma Alanı = 9 m²)	**Numune 1**	**Numune 2**	**Numune 3**	**Numune 4**
Su Debisi (m³/h)	200,00	200,00	200,00	200,00
Su Giriş Sıcaklığı (°C)	35,00	35,00	35,00	35,00
Su Çıkış Sıcaklığı (°C)	30,00	30,00	30,00	30,00
Yaş Termometre Sıcaklığı (°C)	24,00	24,00	24,00	24,00
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	32,00	32,00	32,00	32,00
Atmosfer Basıncı (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3
Gerekli Hava Debisi (m³/s)	23,70	21,08	28,69	24,44
Hava Hızı (m/s)	2,63	2,34	3,19	2,72

Tablo 5.6 Eşit Kule Oturma Alanında Karşılaştırma (Devamı)

Eşit Kule Oturma Alanında Karşılaştırma (Oturma Alanı = 9 m²)	**Numune 1**	**Numune 2**	**Numune 3**	**Numune 4**
Basınç Düşümü (Pa)	246,11	231,06	297,61	259,91
Fan Mil Gücü (kW)	8,8	7,3	13,1	9,5

Tablo 5.7 Dolgudaki Eşit Hava Hızı Değerlerinde Karşılaştırma

Dolgudaki Eşit Hava Hızı Değerlerinde Karşılaştırma (Hava Hızı = 2,5 m/s)	**Numune 1**	**Numune 2**	**Numune 3**	**Numune 4**
Su Debisi (m³/h)	200,00	200,00	200,00	200,00
Su Giriş Sıcaklığı (°C)	35,00	35,00	35,00	35,00
Su Çıkış Sıcaklığı (°C)	30,00	30,00	30,00	30,00
Yaş Termometre Sıcaklığı (°C)	24,00	24,00	24,00	24,00
Kuru Termometre Sıcaklığı (°C)	32,00	32,00	32,00	32,00
Atmosfer Basıncı (kPa)	101,3	101,3	101,3	101,3
Gerekli Hava Debisi (m³/s)	23,70	21,08	28,69	24,44
Basınç Düşümü (Pa)	200,72	279,91	134,85	200,56
Gerekli Oturma Alanı (m²)	9,48	8,43	11,47	9,78
Fan Mil Gücü (kW)	7,1	8,8	6,5	7,3

Tablo 5.6 incelendiğinde, eşit kule oturma alanında, aynı başlangıç şartlarındaki suyu soğutmak için dar hatveli ve yüksek dolgu malzemesinin (Numune 2), hem daha düşük bir hava debisi gerektirdiği, hem de dolgu malzemesi boyunca daha düşük bir hava tarafı basınç düşümüne neden olduğu görülmüştür. Bu sayede daha düşük bir fan mil gücü gerektirmektedir. Eşit kule oturma alanında aynı şartlardaki suyu soğutmak için gerek daha düşük bir hava debisine ihtiyaç duyan, gerekse de

daha düşük bir hava tarafı basınç düşümüne neden olan ve dolayısıyla daha düşük bir fan mil gücü gerektiren Numune 2 dolgu malzemesinin diğer dolgu malzemelerine kıyasla daha yüksek performanslı çalıştığı söylenmektedir. Bu doğrultuda Numune 2 dolgu malzemesini sırasıyla Numune 1, Numune 4 ve Numune 3 dolgu malzemeleri izlemektedir.

Dolgudaki eşit hava hızı değerlerinde, aynı başlangıç şartlarındaki suyu soğutmak için Numune 2 dolgu malzemesinin daha düşük bir hava debisi gerektirmesine rağmen en yüksek hava tarafı basınç düşümüne neden olduğu görülmektedir. Dolgudaki eşit hava hızı değerlerinde bu dolgu malzemesinin en düşük hava debisine ihtiyaç duyuyor olması, incelenen dolgu malzemeleri içinde en küçük kule oturma alanına ihtiyaç duyacağına işaret etmektedir. Öte yandan, dolgu boyunca gerçekleşen hava tarafı basınç düşümünün diğer dolgu malzemeleri ile karşılaştırıldığında en yüksek olması nedeniyle incelenen dolgu malzemeleri içinde en yüksek fan mil gücünü gerektireceği görülmektedir. Numune 3 dolgu malzemesi içinse bunun tersi bir durum söz konusudur (Tablo 5.7).

5.2.2 Ekonomik Analiz

Soğutma kuleleri ortalama olarak haftada 6 gün 12 saat çalışan ekipmanlardır. Periyodik bakımları yapıldığı takdirde ömürleri 10 ile 20 yıl arasında değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple dolgu malzemesi seçimine bağlı olarak yaşam süreleri boyunca doğacak enerji maliyetlerini karşılaştırmak, hangi dolgu malzemesini kullanmanın işletme maliyeti açısından uygun olacağını belirlemek adına yerinde olacaktır. Bu sebeple yukarıda incelenen örnek durumlar için belirlenen her bir fana motor seçimi yapılarak, soğutma kulesi ömrü boyunca dolgu malzemesi kaynaklı gerçekleşecek toplam enerji maliyetleri Tablo 5.9'de eşit kule oturma alanı için, Tablo 5.10'da ise dolgudaki eşit hava hızı değerleri için verilmiştir. Yine bu maliyetler sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Toplam enerji maliyetlerinin belirlenmesinde geometrik artan nakit akışı serisinin bugünkü değer yöntemi kullanılmıştır. Ekonomik analizde kullanılan parametreler Tablo 5.8'de sunulmuştur.

Tablo 5.8 Ekonomik Analizde Kullanılan Parametreler

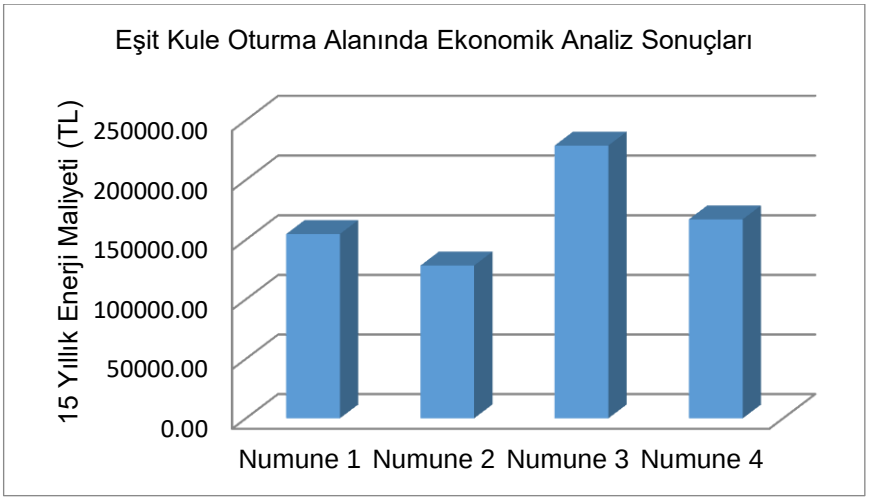
Parametre	Değer
Elektrik Fiyatı (TL/kWh)	0,4030
Faiz Oranı (%)	12,0
Elektrik Fiyatı Artış Oranı (%)	8.8
Aylık Çalışma Süresi (Sa)	288
Yaşam Ömrü (Yıl)	15

Tablo 5.9 Eşit Kule Oturma Alanı için Ekonomik Analiz Sonuçları

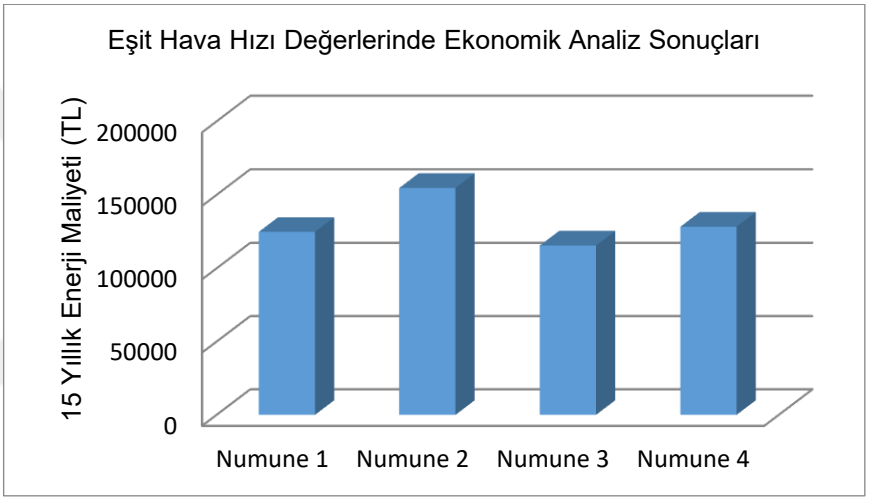
Eşit Kule Oturma Alanında Karşılaştırma	**Numune 1**	**Numune 2**	**Numune 3**	**Numune 4**
Fan Mil Gücü (kW)	8,8	7,3	13,1	9,5
Motor Çekilen Güç (kW)	10,08	8,36	14,91	10,88
Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	34.837	28.899	51.516	37.608
1. Yıl Enerji Maliyeti (TL)	14.039	11.646	20.761	15.156
15 Yıllık Enerji Maliyeti (TL)	154.702	128.333	228.771	167.008

Tablo 5.10 Dolgudaki Eşit Hava Hızı Değerleri için Ekonomik Analiz Sonuçları

Dolgudaki Eşit Hava Hızı Değerlerinde Karşılaştırma	**Numune 1**	**Numune 2**	**Numune 3**	**Numune 4**
Fan Mil Gücü (kW)	7.1	8.8	6.5	7.3
Motor Çekilen Güç (kW)	8.13	10.08	7.53	8.36
Yıllık Enerji Tüketimi (kWh)	28.107	34.837	26.021	28.899
1. Yıl Enerji Maliyeti (TL)	11.327	14.039	10.487	11.646
15 Yıllık Enerji Maliyeti (TL)	124.817	154.702	115.553	128.333



Şekil 5.9 Eşit Kule Oturma Alanı için Ekonomik Analiz Sonuçları



Şekil 5.10 Dolgudaki Eşit Hava Hızı Değerleri için Ekonomik Analiz Sonuçları

İncelenen örnek durum için eşit kule oturma alanında ekonomik analiz sonuçları incelendiğinde, Numune 2 dolgu malzemesinin diğer dolgu malzemelerine kıyasla kule ömrü süresince daha düşük bir enerji maliyetine neden olacağı görülmektedir. Bu dolgu malzemesi kendisine en yakın işletme maliyetine sahip Numune 1'den yaklaşık %15 daha az bir işletme maliyetine sahiptir (Tablo 5.9 ve Şekil 5.9). Bu karşılaştırmada amaç kule oturma alanları eşit olduğu için, soğutma kulesi bileşenlerinin maliyetlerindeki küçük farklılıklar göz ardı edilip ilk yatırım maliyetlerinin eşit olduğu kabul edilerek dolgu malzemelerinin işletme maliyetlerini karşılaştırmaktır. Gerek Tablo 5.9 gerekse Şekil 5.9'dan da görüleceği üzere eşit kule oturma alanında düşük enerji maliyeti sebebiyle Numune 2 dolgu malzemesinin kullanılması parasal tasarruf sağlamaktadır.

Dolgudaki eşit hava hızı değerlerinde ekonomik analiz sonuçlarını karşılaştırmak, soğutma kulesinin ilk yatırım maliyetlerinin de dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir. Çünkü bu karşılaştırmada soğutma kulelerinin oturma alanları, dolayısıyla ilk yatırım maliyetleri birbirinden farklı olmaktadır. Fakat incelenen örnek durum için kule oturma alanlarının birbirlerine yakın olması sebebiyle en temelinde soğutma kulelerinin ilk yatırım maliyetlerini eşit kabul etmek mümkün olabilmektedir. Bu doğrultuda dolgudaki eşit hava hızı değerlerinde Numune 3 dolgu malzemesi kule ömrü süresince kendisine en yakın dolgu malzemesinden yaklaşık %10 daha düşük işletme maliyetine sahip olacaktır (Tablo 5.10 ve Şekil 5.10).

.

6
Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu tez çalışmasında ilk olarak, incelenen dolgu malzemelerinin karakteristik eğrileri ve dolgu performans karakteristik katsayıları elde edilmiştir. İkinci olarak ise dolgu malzemelerinin hava tarafı basınç düşümü katsayısı deneysel sabitleri belirlenmiştir. Gerek dolgu performans karakteristik katsayılarının gerekse hava tarafı basınç düşümü katsayısı deneysel sabitlerinin tespit edilmesi, dolgu malzemelerinin karakteristiklerini tanımlamak adına büyük bir önem arz etmektedir. Soğutma kulesi endüstrisinde elde edilen bu katsayılar kullanılarak soğutma kulesi seçimi kolaylıkla yapılabilmektedir.

Gerçekleştirilen testlerde dar hatveye ve daha büyük bir yüksekliğe sahip Numune 2 dolgu malzemesinin diğer dolgu malzemelerine kıyasla daha yüksek bir soğutma yeteneğine sahip olduğu görülmüştür. Aynı mantık çerçevesinde geniş hatveye ve daha düşük bir yüksekliğe sahip Numune 3 dolgu malzemesinin daha düşük bir soğutma yeteneğine sahip olduğu söylenebilmektedir. Buradan hem dar hem de geniş hatveli dolgu malzemeleri için dolgu yüksekliğinin artmasıyla soğutma yeteneğinin de iyileştiği anlaşılmaktadır. Ayrıca Numune 1 ve Numune 4 dolgu malzemelerinin birbirlerine oldukça yakın ısıl performans sergiledikleri görülmüştür. Buradan hareketle dolgu malzemelerinde yükseklik farkı nedeniyle meydana gelen soğutma yeteneğindeki iyileşmenin, dar hatveli dolgu malzemeleri kullanılarak telafi edilebileceği öngörülmektedir.

Soğutma kulelerinde kullanılan dolgu malzemesinin tipine, yüksekliğine ya da imal edildiği malzemenin özelliklerine bağlı olarak, belirli şartlardaki suyu soğutmak için gerekli hava debisi ve hava tarafı basınç düşümü değeri değişmektedir. İncelenen örnek durum için eşit kule oturma alanında aynı başlangıç koşullarındaki suyu soğutmak için Numune 2 dolgu malzemesinin hem daha düşük bir hava debisi gerektirdiği, hem de dolgu malzemesi boyunca daha düşük bir hava tarafı basınç düşümüne neden olduğu görülmüştür. Bu sebeple aynı soğutma

performansı için daha düşük bir fan mil gücüne ihtiyaç duyuyor olması ve kule ömrü boyunca daha düşük bir enerji maliyeti gerektirmesi sayesinde tercih nedeni olmaktadır. Yine incelenen örnek durumdan yola çıkılarak sadece doğru dolgu malzemesinin seçimiyle önemli miktarlarda parasal tasarrufun mümkün olabileceği görülmüştür.

Dolgudaki eşit hava hızı değerlerinde, aynı şartlardaki suyu soğutmak için Numune 2 dolgu malzemesi daha küçük bir kule oturma alanına ihtiyaç duyuyorken daha yüksek bir fan mil gücü gerektirmektedir. Numune 3 dolgu malzemesi içinse bunun tersi bir durum söz konusudur. Buradan alanın sınırlı olduğu soğutma kulesi uygulamalarında işletme maliyetleri yüksek olmasına karşın daha küçük bir oturma alanında aynı soğutmayı sağlayacak dar hatveli dolgu malzemelerinin tercih sebebi olacağı sonucu çıkarılmaktadır. Enerji verimliliğinin ön planda olduğu ve kule oturma alanının sorun teşkil etmeyeceği uygulamalarda ise geniş hatveli dolgu malzemeleri düşük işletme maliyeti sayesinde tercih sebebi olabilmektedir.

Suyun daha büyük bir yüzeyinin daha uzun bir süre hava akımına maruz bırakılması amacıyla dolgu malzemesinin ısı değiştirme yüzey alanı, yani birim hacimdeki dolgu yüzey alanı, ya da dolgu malzemesinin yüksekliği arttırılmaktadır. Fakat dolgudaki eşit hava hızı değerlerinde karşılaştırmadan da görüleceği üzere, dolgu yüksekliğinin arttırılması beraberinde hava tarafı basınç düşümünün artması problemini de getirmektedir. Bu sebeple bundan sonraki çalışmalarda film tipi dolgu malzemeleri için hangi yüksekliğin optimum ısıl performans ve basınç kaybı kombinasyonunu vereceği üzerine çalışma yapılması planlanmaktadır.

Bu çalışmada sunulan prosedür aynı zamanda ihtiyaca uygun soğutma kulesi seçiminin temelini oluşturması bakımından büyük bir önem arz etmektedir. Çünkü soğutma kulesi seçiminin en temelinde belirli şartlardaki bir suyu soğutmak için gerekli hava debisinin belirlenmesi ve bu hava akımının kule boyunca geçerken meydana gelecek hava tarafı basınç düşümü değerinin hesaplanması yatmaktadır.

Kaynakça

[1] A. Kotb, "Determination of optimum height for counter flow cooling tower" Asian Journal of Applied Science and Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 33–47, 2013.

[2] A. K. M. Mohiuddin ve K. Kant, "Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Part I: Selection and tower characteristics" International Journal of Refrigeration, vol. 19, no. 1, pp. 43–51, 1996.

[3] A. K. M. Mohiuddin ve K. Kant, "Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Part II: Fill and other design parameters" International Journal of Refrigeration, vol. 19, no. 1, pp. 52–60, 1996.

[4] N. Milosavljevic ve P. Heikkilä, "A comprehensive approach to cooling tower design" Applied Thermal Engineering, no. 21, pp. 899–915, 2001.

[5] M. S. Söylemez, "On the optimum sizing of cooling towers" Energy Conversion and Management, no. 42, pp. 783–789, 2001.

[6] J. U. R. Khan, M. Yaqub ve S. M. Zubair, "Performance characteristics of counter flow wet cooling towers" Energy Conversion and Management, no. 44, pp. 2073–2091, 2003.

[7] J. C. Kloppers ve D. G. Kröger, "Loss coefficient correlation for wet-cooling tower fills" Applied Thermal Engineering, no. 23, pp. 2201–2211, 2003.

[8] J. U. R. Khan, B. A. Qureshi ve S. M. Zubair, "A comprehensive design and performance evaluation study of counter flow wet cooling towers" International Journal of Refrigeration, no. 27, pp. 914–923, 2004.

[9] S. P. Fisenko, A. A. Brin ve A. I. Petruchik, "Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower" International Journal of Heat and Mass Transfer, no. 47, pp. 165–177, 2004.

[10] J. C. Kloppers ve D. G. Kröger, "A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers" International Journal of Heat and Mass Transfer, no. 48, pp. 765–777, 2005.

[11] J. C. Kloppers ve D. G. Kröger, "The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers" International Journal of Thermal Sciences, no. 44, pp. 879–884, 2005.

[12] F. Gharagheizi, R. Hayati ve S. Fatemi, "Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing" Energy Conversion and Management, no. 48, pp. 277–280, 2007.

[13] J. Khorshidi, M. Baniasadi ve H. Davari, "Performance study and comparison of three types of film fill packings in Bisotoun power plant of Kermanshah province in Iran using Merkel Model" Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, vol. 6, no. 13, pp. 2459–2463, 2013.

[14] B. K. Naik, V. Choudhary, P. Muthukumar ve C. Somayaji, "Performance assessment of a counter flow cooling tower – unique approach" Energy Procedia, no. 109, pp. 243–252, 2017.

[15] N. Liu, L. Zhang ve X. Jia, "The effect of the air water ratio on counter flow cooling tower", Procedia Engineering, no. 205, pp. 3550–3556, 2017.

[16] ASHRAE, 2000 ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., ASHRAE Amerika Birleşik Devletleri, 2000.

[17] D. G. Kröger, Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers (1), PenWell Corporation, Oklahoma, 2004.

[18] Black & Veatch, Power Plant Engineering, Springer Science + Business Media, Inc. Amerika Birleşik Devletleri, 1996.

[19] Cenk Endüstri Tesisleri İmalat ve Taahhüt A.Ş., Karşı Akışlı Açık Çevrim Soğutma Kulesi Kataloğu, İstanbul, 2018.

[20] Cenk Endüstri Tesisleri İmalat ve Taahhüt A.Ş., Karşı Akışlı Kapalı Çevrim Soğutma Kulesi Kataloğu, İstanbul, 2018.

[21] Niba Soğutma Kuleleri San. ve Tic. A.Ş., Soğutma Kuleleri Kataloğu, İstanbul, 2018.

[22] S. K. Wang, Handbook of Air Conditioning and Refrigeration, İkinci Baskı, McGraw-Hill. Amerika Birleşik Devletleri, 2001.

[23] Y. A. Çengel ve M. A. Boles, Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla, Beşinci Baskı, İzmir Güven Kitapevi, İstanbul, 2012.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: canertukta@hotmail.com

Konferans Bildirileri

1. C. Tukta, Ş. Ö. Atayılmaz, "İki Farklı Hatve Değerine Sahip Karşı Akışlı, Islak Tip Soğutma Kulesi PVC Film Dolgu Malzemelerinin Performans Değerlendirmesi", 4. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul, 2019.