MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstriyel Tip Islak Soğutma Kulelerinin Deneysel ve Teorik Analizi

GÖRKEM ZENGİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. AYHAN ONAT

İSTANBUL, 2019

KABUL ve ONAY BELGESİ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Görkem Zengin'in **"Endüstriyel Tip Islak Soğutma Kulelerinin Deneysel ve Teorik Analizi"** başlıklı tez çalışması, 28/03/19 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

(Danışman)
Marmara Üniversitesi Doç. Dr. Ayhan ONAT .....

(Üye)
Marmara Üniversitesi Prof. Dr. M. Osman ISIKAN .....

(Üye)
Kocaeli Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet UÇAR .....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02.04.19 tarih ve 2019/05-02 sayılı kararı ile Görkem Zengin'in Makine Mühendisliği Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Bülent EKİCİ
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

İklimlendirme ve soğutma konusunda araştırmalarımı başlatan ve tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve destek olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Ayhan Onat'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Soğutma kulesi test düzeneğinin kurulumundan test sonuçlarının toplanmasına, analiz sonuçlarının yorumlanması ile ilgili destekleri için Ersan Bakanay ve Birhan Bakanay'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

2016 yılından bu yana sürekli yeni hedefler koyarak teknik ve teorik olarak geliştirmeme katkı sağlayan departman müdürümüz Toros Arslanyan'a ve birlikte çalıştığım tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Her türlü zorlukta bana destek olup yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

İçindekiler Tablosu

ÖZET I
ABSTRACT II
SEMBOLLER III
KISALTMALAR IV
ŞEKİL LİSTESİ V
TABLO LİSTESİ VII
1. GİRİŞ 1
1.1. Literatür Taraması 2
1.2. Soğutma Kulesi Terimleri 4
1.2.1. İşletme terimleri 4
1.2.2. Dizayn terimleri 5
1.2.3. Mekanik terimler 8
1.3. Soğutma Kulesi Çeşitleri 10
1.3.1. Hava çekiş tipine göre soğutma kuleleri 10
1.3.1.1. Mekanik çekişli soğutma kuleleri 10
1.3.1.2. Doğal çekişli soğutma kuleleri 12
1.3.2. Akış tipine göre soğutma kuleleri 14
1.3.2.1. Karşı akışlı soğutma kuleleri 14
1.3.2.2. Çapraz akışlı soğutma kuleleri 15
1.4. Soğutma Kulesi Ekipmanları 16
1.4.1. Yapısal ekipmanlar 16
1.4.1.1. Soğuk su toplama havuzu 16
1.4.1.2. Su dağıtım sistemi 19
1.4.1.3. Fan bacası 21
1.4.1.4. Soğutucu dolgu 21
1.4.1.5. Damla tutucu 22
1.4.1.6. Hava giriş panjuru 23
1.4.1.7. Dış kaplama ve taşıyıcı yapı 23
1.4.2. Elektrik ve mekanik ekipmanlar 24
1.4.2.1. Fan 25
1.4.2.2. Güç aktarma organları 26
1.4.2.3. Elektrik motoru 28
1.5. Soğutma Kulesi Performansını Etkileyen Faktörler 28

1.5.1. Su sirkülasyon debisi 28
1.5.2. Su giriş sıcaklığı 29
1.5.3. Su çıkış sıcaklığı 29
1.5.4. Sıcaklık farkı 29
1.5.5. Soğutma suyunun durumu 29
1.5.6. Su ve hava dağılımları 30
1.5.7. Buharlaşma miktarı 30
1.5.8. Blöf miktarı 30
1.5.9. Sürüklenme kaybı 31
1.5.10. Besleme suyu miktarı 31
1.5.11. Hava debisi 31
1.5.12. Yaş termometre sıcaklığı 31
1.5.13. Kuru termometre sıcaklığı 32
1.5.14. Atmosferik basınç 32
1.5.15. Rakım 32
2. MATERYAL ve YÖNTEM 34
2.1. Materyal 34
2.1.1. Test istasyonunun özellikleri ve kullanılan ekipmanlar 34
2.1.1.1. Sıcak su hattı 34
2.1.1.2. Plakalı tip ısı değiştirici 34
2.1.1.3. Soğutma kulesi çevrim suyu pompası 35
2.1.1.4. Test soğutma kulesi 36
2.1.2. Kullanılan Ölçüm Cihazları 37
2.1.2.1. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılanlar 37
2.1.2.2. Hava tarafı basınç ölçüm cihazları 39
2.1.3. Debimetre 40
2.1.4. Yaş termometre sıcaklığı ölçüm cihazları 40
2.2. Yöntem 41
2.2.1. Kütle transferi hesaplamaları 41
2.2.2. Isı transferi hesaplamaları 43
2.2.3. Ampirik yaklaşım korelasyonları 48
2.2.4. Merkel yaklaşımında Chebyshev teoremi uygulamasıyla performans hesaplaması 49
2.2.5. Basınç kaybı hesaplamaları 50
3. BULGULAR ve TARTIŞMA 51
3.1. Bulgular 51

3.1.1. Termal performans testleri 51
3.1.2. Termal Test Sonuçlarından Merkel'e Göre Dolgu Katsayılarının Oluşturulması 55
3.1.3. Basınç kaybı test sonuçları ve analizi 57
3.2. Tartışma 59
4. SONUÇ 61
KAYNAKLAR 1
ÖZGEÇMİŞ 64

ÖZET

Soğutma kuleleri fabrikalarda, enerji üretim tesislerinde ve konut tipi yapıların iklimlendirmelerinde, özetle soğuk su ihtiyacı olan yerlerde kullanılan yüksek verimli ve düşük maliyetli soğutma üniteleridir. Basitçe çalışma prensiplerini tanımlamak gerekirse; prosesteki sıcak suyun içeriğindeki ısıyı soğuk havaya dolgular ve spreyleme teçhizatlarının da yardımıyla aktararak ısı transferi yapan ekipmanlardır. Bu ısı aktarımının termal verimini arttırmak için birbirinden farklı çok sayıda sistem tasarımları bulunmaktadır. Bu tasarımlardan biri de dolgu yüksekliğinin değiştirilmesidir.

Bu çalışmada dolgu yüksekliğindeki değişikliklerin performansa etkisi incelenmiştir. Deneysel olarak yapılan çalışmada dört farklı yükseklikteki dolgunun ampirik hesaplama katsayıları çıkartılmıştır. Dezavantajları ve avantajları incelenmiştir.

1500, 1800, 2100 ve 2400 mm'lik dolgu yüksekliklerinde performans testleri yapılmıştır. Bu testlerde termal giriş çıkış sıcaklıkları ölçülmüş ve sonucunda termal hesaplama korelasyon katsayıları çıkartılmıştır. Merkel yaklaşımına göre performansı en düşük olan 1500 mm'lik dolgu olurken en yüksek performans 2400 mm'lik yüksekliğe sahip olan dolgu yüksekliğinde çıkmıştır.

Termal performans testlerinin yapıldığı sırada dolgudaki basınç kaybı değeri de her koşulda ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda da farklı dolgu yüksekliklerinde, hava hızlarında ve su yüklerindeki hava direnci değerlerini veren grafikler elde edilmiştir.

En düşük direnç değeri 1500 mm'lik dolguda ölçülürken en yüksek değer de 2400 mm'lik dolguda ölçülmüştür. Soğutma kuleleri dizaynında dolgu yüksekliği ne kadar artırılırsa performans o kadar artmaktadır, lakin bu artışla birlikte hava tarafı direnci de artmaktadır.

Endüstriyel Tip Islak Soğutma Kulelerinin Deneysel ve Teorik Analizi

ABSTRACT

Wet cooling towers are high thermal efficient and cost effective industrial cooling units which are used in factories, energy plants and heating, ventilating and air conditioning sector (HVAC). For simply describe of the working principles; hot process water cools with cold atmosphere air by the help of cooling fills and water distribution systems. There are many different system designs to increase the thermal efficiency of this heat transfer. One of these designs is to change the fill height.

In this study, the effect of fill height changes on thermal performance are investigated. In the experimental study, four different cooling fill height's empirical calculation coefficients are found. Disadvantages and advantages are examined.

Performance tests were performed at fill heights of 1.500, 1.800, 2.100 and 2.400 mm. In these tests, thermal input output temperatures were measured and thermal correlation coefficients were calculated. According to the Merkel approach, 1500 mm has the lowest and 2.400 mm has the highest performance coefficient about cooling fill height change.

During thermal performance tests, the pressure loss value on cooling fill was measured separately in each condition. With these measurements, graphs were obtained for different fill heights, air velocity and water loading values.

The lowest resistance value is measured on 1500 mm fill height and the highest resistance value is measured in the 2400 mm fill. Increased cooling fill height will improve thermal performance but higher height cooling fill will make more pressure loss on air side.

Experimental and Theoretical Analysis of Industrial Type Wet Cooling Towers

SEMBOLLER

Sembol	Açıklama	Birim
m	Kütlesel debi	kg/s
w	Özgül nem	kg/kg
h	Entalpi	kJ/kg
c_p	Sabit basınçta özgül ısı	kJ/kg.K
T	Sıcaklık	°C
Q	Isı transfer kapasitesi	kW
K	Kütle transfer katsayısı	-
A	Alan	m^2
Le_f	Lewis Faktörü	
a	Dolgu ısı transfer alan yoğunluğu	m^2/m^3
l	Uzunluk	m
V	Ön yüz alanının Lewis faktörüne oranı	m^2
L/G	Su debisinin hava debisine kütlesel oranı	-
c	Dolgu performans katsayısı	-
n	Dolgu performans katsayısı	-
k	Dolgu basınç kaybı katsayısı	-
ρ	Yoğunluk	kg/m^3
v	Hız	m/s

KISALTMALAR

Sembol	Açıklama
w	Su
a	Hava
ma	Nemli hava
m	Kütle transferine bağlı gizli ısı
c	Duyulur ısı
sw	Su damlası
wo	Su çıkış
v	Su buharı
fi	Dolgu
fr	Ön, karşı
wi	Su giriş

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1. Enerji santralinin su soğutma devresi 1
Şekil 1. 2. Aksiyal Fanlı Mekanik Çekişli Soğutma Kulesi 11
Şekil 1. 3. Aksiyal Fanlı Cebri İtişli Soğutma Kulesi 11
Şekil 1. 4. Radyal Fanlı Cebri İtişli Soğutma Kulesi 12
Şekil 1. 5. Çapraz ve Karşı Akışlı Soğutma Kuleleri 13
Şekil 1. 6. Fan Destekli Doğal Çekişli Soğutma Kulesi 13
Şekil 1. 7. Karşı Akışlı Soğutma Kulesi 15
Şekil 1. 8. Çapraz Akışlı Soğutma Kulesi 16
Şekil 1. 9. Taze Su Besleme Şamandırası 17
Şekil 1. 10. Elektronik Seviye Kontrol / İzleme Cihazı 17
Şekil 1. 11. Donmuş Bir Soğutma Kulesi 18
Şekil 1. 12. Elektrikli Havuz Isıtıcısı 18
Şekil 1. 13. Soğutma Suyu Servis Hattı Filtrasyonu Sistemi 19
Şekil 1. 14. Su Dağıtım Sistemi 20
Şekil 1. 15. Soğutma Kulesi Fıskiye Örnekleri 20
Şekil 1. 16. Fan Bacası 21
Şekil 1. 17. Film Tipi Dolgu 22
Şekil 1. 18. Sıçratmalı Tip Dolgu 22
Şekil 1. 19. Bigudi Tipi Dolgu 22
Şekil 1. 20. Damla Tutucular 22
Şekil 1. 21. Hava Giriş Panjurları 23
Şekil 1. 22. Camelyaf Takviyeli Polyester Soğutma Kulesi 24
Şekil 1. 23. Betonarme Soğutma Kulesi 24
Şekil 1. 24. Çelik Soğutma Kulesi 24
Şekil 1. 25. Soğutma Kulesindeki Elektrik ve Mekanik Ekipmanlar 25
Şekil 1. 26. Aksiyal Fan 26
Şekil 1. 27. Kayış Kasnaklı Güç Aktarımı 27
Şekil 1. 28. Dişli Redüktör 27
Şekil 1. 29. Elektrik Motoru 28

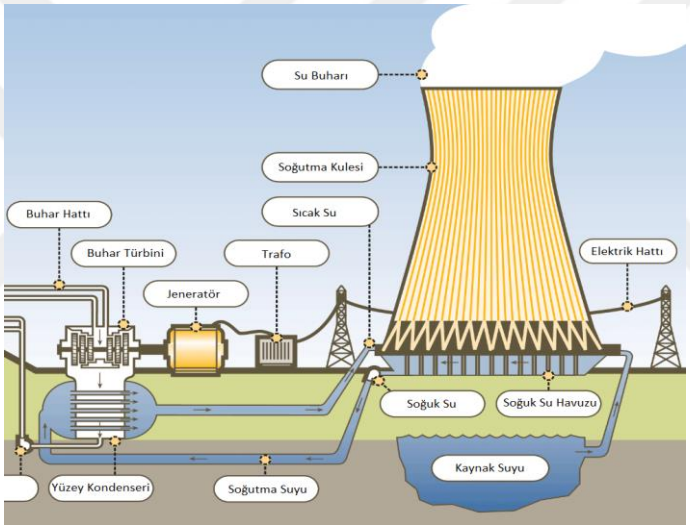
Şekil 2. 1. Sıcak su kazanı 34
Şekil 2. 2. Sıcak su pompası 34
Şekil 2. 3. Plaka Tipi Isı Değiştirici Resmi 35
Şekil 2. 4. Soğutma Kulesi Pompası Resmi 35
Şekil 2. 5. Soğutma Kulesi Deney Düzeneği 37
Şekil 2. 6. Sıcaklık Transmitteri 38
Şekil 2. 7. Fark Basınç Transmitteri 39
Şekil 2. 8. Pitot Tüpü 39
Şekil 2. 9. Pitot Tüpü ile Ölçüm Noktası 39
Şekil 2. 10. Debimetre 40
Şekil 2. 11. Yaş Termometre Ölçüm Cihazı 40
Şekil 2. 12. Soğutma Kulesindeki Havanın Psikrometrik Gösterimi 42
Şekil 3. 1. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 1 53
Şekil 3. 2. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 2 53
Şekil 3. 3. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 3 53
Şekil 3. 4. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 4 54
Şekil 3. 5. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 5 54
Şekil 3. 6. 1.500 mm Yüksekliğindeki Dolgunun Performans Eğrisi 55
Şekil 3. 7. 1.800 mm Yüksekliğindeki Dolgunun Performans Eğrisi 55
Şekil 3. 8. 2.100 mm Yüksekliğindeki Dolgunun Performans Eğrisi 56
Şekil 3. 9. 2.400 mm Yüksekliğindeki Dolgunun Performans Eğrisi 56
Şekil 3. 10. Dolgu Yüksekliklerine Göre Düzeltilmiş Performans Eğrileri 57
Şekil 3. 11. 1.500 mm'lik dolgunun basınç kaybı değerleri 58
Şekil 3. 12. 1.800 mm'lik dolgunun basınç kaybı değerleri 58
Şekil 3. 13. 2.100 mm'lik dolgunun basınç kaybı değerleri 58
Şekil 3. 14. 2.400 mm'lik dolgunun basınç kaybı değerleri 59

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. 1 Rakım Atmosfer Basıncı İlişkisi 33
Tablo 2. 1. Soğutma Kulesi Özellikleri 36
Tablo 2. 2. Hava Tarafı Sıcaklık Transmitteri Özellikleri 38
Tablo 2. 3. Su Tarafı Sıcaklık Transmitteri Özellikleri 38
Tablo 2. 4. Psikrometrik Değerler 42
Tablo 3. 1. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 1 51
Tablo 3. 2. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 2 51
Tablo 3. 3. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 3 52
Tablo 3. 4. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 4 52
Tablo 3. 5. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 5 52
Tablo 3. 6. Dolgu Yüksekliklerine Göre Performans c ve n Katsayıları 57

1. GİRİŞ

Soğutma kuleleri ısı ve kütle transferi ile su soğutan endüstriyel ünitelerdir. Sıcak su, dağıtıcı fıskiyeler vasıtasıyla film tipi dolgu bloklarının veya sıçratma tipi dolgu yapılarının üzerine püskürtülerek atmosfer havası ile su arasında geniş yüzey alanları oluşturulması sağlanır. Havanın ortama girişi mekanik çeşitli soğutma kulelerinde fan ve mekanik grup vasıtasıyla olurken doğal çekişli soğutma kulelerinde basınç dengesi ile sağlanır. Bu işlem sırasında çevrimdeki suyun bir kısmı giren havanın doymamış formda olması dolayısıyla buharlaşır. Su buharlaşırken bir yandan da enerji transferi olur bu enerji transferi ile de çevrim suyu soğur (Kröger, 2004). Şekil 1.1'de enerji santralinin su soğutma devresi görülmektedir.



Şekil 1. 1. Enerji santralinin su soğutma devresi

Türbin çıkış buharı, basıncı ve ısı enerjisi azalmış entalpisi düşmüş çürük buhar, yüzey kondenserine giriş yaptıktan sonra soğutma kulesinden gelen soğuk su boruların dış yüzeyiyle temas ederek buharın yoğuşmasını sağlar. Bu yoğuşma sırasında sıvı faza geçen türbin çıkış buharı pompalar ile kazana giderek çevrimine devam eder. Bunun yanı sıra soğutma kulesinden gelen suyun çevrimi ise yüzey kondenserinden sonra sıcaklığı ve entalpisi yükselmiş şekilde geri dönerek soğutma kulesinin sıcak su hattına gider.

Sıcak su soğutma kulesinde önce su dağıtım kolektörlerine gönderilir. Sonrasında fıskiyelerde dağıtılarak, küçük su damlacıkları olacak şekilde dolguların üzerine püskürtülür. Dolgunun alt kotundan gelen soğuk ve entalpisi düşük hava sürekli olarak

yüksek ısı ve kütle transfer alanlarında temas kurar. Bu süre zarfında kuru hava neme doyarken bir miktar soğutma suyu buharlaşır. Soğutma kulesine sıcaklığı ve entalpisi yüksek olarak giren soğutma suyu soğuk olarak havuzda toplanırken, atmosfer havası yaklaşık %100'e kadar neme doymuş ve entalpisi yükselmiş şekilde bacadan kule ortamını terk eder. Burada havanın aldığı enerji ile suyun verdiği enerji birbirine eşittir. Bu denklik soğutma kulesindeki genel ısı transfer denkliğini oluşturmaktadır. Kaybedilen su miktarı da sürüklenen ve buharlaşan su miktarına eşit olarak soğutma kulesinin kütle transfer denkliğini oluşturmaktadır. Soğutma kulelerinde soğutma rejimine ve ısı transfer rejimi gibi temel kriterlere bağlı olarak ortalama buharlaşma oranı çevrim su debisinin yaklaşık %1-3'ü kadardır (Kröger, 2004).

1.1. Literatür Taraması

Bu bölümde soğutma kulelerinin performans testleri yapılmadan önce incelenen çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmalar sayesinde soğutma kulesinin hesaplama algoritması çıkartılmış, değişkenler belirlenmiştir.

Johannes Christiaan Kloppers 2003 yılında tamamladığı doktora tezinde Merkel, Poppe ve e-NTU metodunu detaylıca irdelemiştir. Çalışmada kullanılan kaynak değerler karşı akışlı bir doğal çekişli soğutma kulesinden faydalanılmıştır. Tezin sonucunda üç hesaplama metodundan da hesaplama yapabilen bir yazılım oluşturulmuştur (Kloppers J. C., 2003).

Andre Alexis Dreyer'in 1988 yılında tamamladığı yüksek lisans tezinde yapmış olduğu analizler sayesinde algoritmalardan faydalanılmıştır. Yine Kloppers'in tezindeki gibi üç tip hesaplama metodu üzerinde de çalışmıştır. Ayrıca kondenser hesaplamaları üzerine de çalışmalarını sürdürmüştür (Dreyer, 1988).

VDI Heat Atlas kaynağının N4 bölümünde soğutma kulelerini teorik olarak özetlenmiştir. Özellikle ilgili bölümde dolgu üzerindeki film tabakada suyun izlediği yol ve havanın izlediği yol detaylıca görseller ile irdelenmiştir. Buradaki ısı ve kütle dengesinin karşı akışlı bir soğutma kulesindeki hali üzerine açıklamalar yapılmıştır. Merkel metodunun basit ve yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği için daha çok kullanıldığı belirtilmiştir. Dört noktalı Chebyshev sayısal yaklaşımıyla da bilgisayar analizli sonuçlara gerek olmadan hesaplama yapılabilme olanağı sağladığından bahsedilmiştir (VDI, 2010).

Gharagheizi, Hayati ve Fatemi'nin 2007 yılında yaptığı dolgu karşılaştırma çalışmasında aynı tip film yaprakları birinde dikey birinde yatay yapıştırılmıştır. 0,5 x 0,5 m'lik test stantlarında yapılan testler sonucunda gerçekçi L/G – KaV/L eğrileri elde etmişlerdir. Grafikten korelasyon katsayılarını elde ederken 0,2 ile 4 L/G aralığını kullanmışlardır. Yaptığımız çalışmalarda hassasiyet yüzdesi daha yüksek olduğu için 0,5 ile 5 aralığı kullanılmıştır (Gharagheizi, Hayati, & Fatemi, 2007).

Kahire Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde 2008 yılında yapılan deneysel soğutma kulesi kurulum çalışması incelenmiştir. Farklı deney düzeneklerinin incelendikten sonra kurulum bilgisi ve malzeme bilgisi verilmiştir. Çalışmaya başlanmadan önce özellikle Gunt, Armfield ve Hilton markalı deney ekipmanları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda ise farklı tipte dolguların test edilebilmesine yönelik bir ekipman oluşturulmuştur (Khalil, Khater, & Mostafa, 2008).

Ramakrishnan ve Arumugam'ın 2014 yılında yayınlamış oldukları makalede farklı tipte kiremitlerin soğutma kulesi dolgusu olarak kullanılması sonucundaki performansları karşılaştırılmıştır. Yaptığımız çalışmada aynı tip dolguların yüksekliğinin artışının performansa oranı araştırılırken bu çalışmada ise farklı geometrideki soğutucu dolgular üzerinde çalışma yapılmıştır. 3 farklı tip kiremit çeşidini karşılaştırmışlardır. Deney sonucunda ise 20 mm çapında dairesel kiremit, üçgen ve 100 mm çapında dairesel tip kiremitten daha efektif olduğu ölçülmüştür (Ramakrishnan & Arumugam, 2014).

Lemouari, Boumaza ve Mujtaba'nın 2007'de yapmış oldukları çalışmada soğutma kulesindeki su yükünün, yani metrekareye spreylenen su miktarının, performansa etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan deney düzeneğine düşük ve yüksek debilerde su gönderilerek L/G – kAv/L eğrileri çıkartılmıştır. Çalışma sonucunda yüksek debilerde soğutma kulesinin performansının arttığı gözlenmiştir (Lemouari, Boumaza, & Mujtaba, 2007).

Heidarimejad, Karami ve Delfani'nin 2008'de yayınlamış oldukları makalede ise yağmurlama, dolgu ve sprey bölgelerindeki ısı transfer hesaplamaları nümerik olarak çalışılmıştır. Hesaplamaları yaparken literatürde yayınlanmış deney sonuçları kullanılmıştır. Çalışmalarının sonucunda ise sprey ve yapmurlama bölgesindeki ısı transferinin orta ve büyük soğutma kulelerinde yüksek etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Heidarinejad, Karami, & Delfani, 2009).

Pan, Shieh, Jang, Tseng,Wu ve Ou'nun 2011 yılında yayınladınları makalede statik çoklu model yaklaşımıyla soğutma kulesi termal olarak analiz edilmiştir. Modellemede ihtiyaç duyulan verilere soğutma kulesi üreticilerinden temin etmişlerdir. Çalışmalarında yeni bir hesaplama yaklaşımı üzerinde durmuşlardır. Bu metodun da başarısını hesaplamalarının sonucunda deney verileri ile uyuma dayandırmışlardır (Pan, ve diğerleri, 2011).

Stefanovic, Lakovic, Radojkovic ve Ilic 2000 yılında değişik hava ve su debilerinde soğutma kulesi üzerindeki 26 adet sıcaklık transmitteriyle incelenip termal modellemesinin grafikleştirildiği bir çalışma yayınlamışlardır. Çalışmada özellikle soğutma kulesindeki kütle ve ısı transferi modellenmiştir (Stefanović, Laković, Radojković, & Ilić, 2000).

Dvořák & Nožička'ın 2014 yılında yaptığı çalışmada bir test ünitesi tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu çalışmada hava tarafı basınç kaybını ölçmek için soğutma kulesinin dört farklı bölgesindeki basıncı ölçmeye yönelik bir prob kullanılmıştır. (Dvořák & Nožička, 2014).

Vitkovič, Syrovátka ve Nožička 2006 yılında basınç kayıpları için yaptığı farklı bir çalışmada elde edilen test sonuçları grafiklerinden esinlenilerek mevcut test sonuçlarımızın hesaplama formülleri geliştirilmiştir. (Vitkovič, Syrovátka, & Nožička, 2006).

1.2. Soğutma Kulesi Terimleri

Bu kısımda soğutma kulelerinde kullanılan terimler kısaca tanıtılmıştır.

1.2.1. İşletme terimleri

Blöf;

Yüksek mineral içeriğine sahip iletkenliği yüksek suyun kuleden atılması işlemine blöf denir. Bazı kaynak sularında bulunan silikat vb. iyonlar da kristaller oluşturarak soğutma sistemine gerek performansına gerekse direkt ekipmanlara hasar meydana getirebilir. Geleneksel yöntemler ile silik iyonu sudan arındırılamadığı için en uygun yöntem sudaki minerallerin düşük ve kontrol altında tutulmasıdır. Bunun için soğutma suyunda her gün blöf yapılması ve yerine taze su takviye edilmesi gerekir. Soğutma kulesinden suyun buharlaşması sistemdeki eriyik madde oranını yükseltir. Çevrim suyunun belli zaman

aralıklarında ve belli oranlarda blöf yapılması eriyik madde miktarının kontrol altında tutulması için gereklidir. (Burkut, 1995)

Buharlaşma Kaybı;

Kütle transferi ile birlikte ısı transferi sırasında buharlaşıp sistemi terkeden su miktarına denir.

Egzos Havası;

Soğutma kulesini terkeden enerjisi yüksek nemli havaya denir. Soğutma kulesinin emişi ile resürkilasyon halinde olmamasına dikkat edilir.

pH;

Çevrim suyunun asitlik bazlık derecesidir. Özel durumlar dışında 8 – 9,5 arasında olması istenir (Uzunlar, 1998).

Besleme;

Kaybedilen suyun temin edilmesine denir. Genelde şebekeden veya kuyu, göl gibi doğal kaynaklardan sağlanır.

Sis;

Özellikle kışın çalışan soğutma kulelerinin bacaları sislenme yapar. Otoyola veya havaalanlarına yakın soğutma kulelerinde sis önleyici sistemler de kullanılabilir.

Resürkilasyon;

Kule performansını belirleyen en önemli faktör, giriş havasının yaş termometre sıcaklığıdır. Eğer soğutma kulesine giren hava egzoz havasından gelirse soğutma kulesinde çok ciddi performans kayıpları yaşanır. Bunu önlemek için sektörde bir çok metot kullanılmaktadır.

1.2.2. Dizayn terimleri

Hava Debisi;

Soğutma kulesinde fanlarla sağlanan toplam debiye denir. Hesaplamalarda kütlesel debi için genellikle kg/s, hacimsel debi için ise m^3/s birimi kullanılır.

Yaklaşım;

Soğuk su ile yaş termometre arasındaki sıcaklık farkına yaklaşım denir. Yaklaşım ne kadar az olursa soğutma o kadar zorlaşır ve daha büyük kapasitedeki ürünlere ihtiyaç duyulur.

Motor Mil Gücü;

Fanın istenilen hava debisini sağlaması ve basınç kaybını yenmesi için ihtiyaç duyulan güce denir. Motor seçimleri için gereklidir.

Hava Girişi;

Soğutma kulelerinin genellikle alt kısmında bulunur. Atmosfer havasının soğutma kulesine girdiği bölgeye denir.

Hava Hızı;

Soğutma kulesi dizaynında temel olarak 4 bölgedeki hava hızı önemlidir. Bunlar, panjurdaki, dolgudaki, damla tutucudaki ve bacadaki hava hızlarıdır. Bu durumun başlıca nedeni ise soğutma kulesindeki temel direnç noktaları olmalarından kaynaklanmaktadır.

Soğutma Kapasitesi;

Soğutma kulelerinin kapasitesi su debisi veya ısı transfer kapasitesi cinsinden tanımlanabilir. Su debisi olarak dizayn edilen soğutma kulelerinde kütlesel veya hacimsel debi kullanılır.

Su Debisi;

Soğutma kulesine birim zamanda giren sıcak su miktarına denir. Soğutma kapasitesi olarak da kullanılabilir.

Soğuk Su Sıcaklığı;

Soğutma kulesinde havuzda toplanacak soğuk suyun sıcaklığıdır. Soğutma kulesini terkedecek suyun sıcaklığıdır.

Karşı Akışlı;

Soğuk hava ile sıcak suyun birbirine zıt yönde ısı transferine zorlandığı soğutma kulesi çeşididir.

Çapraz Akışlı;

Soğuk hava ile sıcak suyun birbirine 90° açıdan ısı transferine zorlandığı soğutma kulesi çeşididir.

Su Sürüklenmesi;

Hava ve su sürekli hareket halindedir. Bazı küçük su damlacıkları havaya karışıp ortamı terk etmesidir.

Isı Yükü;

Yapılacak toplam ısı transferine denir. Soğutma kapasitesi anlamına da gelir.

Sıcak Su Sıcaklığı;

Soğutma kulesine gelen suyun sıcaklığıdır. Suyun sıcaklığına göre dolgu malzemesi tercihi değişiklik gösterebilir.

L/G Değeri;

L/G değeri "liquid" ve "gas" terimlerinden gelmektedir. Anlamı 1 kg hava ile soğutulan su miktarıdır. Dolgu malzemeleri değiştirilerek L/G değeri değiştirilebilir.

Doğal Çekişli;

Fan ve mekanik ünitesi bulunmayan soğutma kulelerine denir.

Basma Yüksekliği;

Soğutma kulelerine gelen su pompalar vasıtasıyla iletilir. Pompanın da dizayn edilmesinde karşılaşacağı statik basınç farkı değeri bilinmelidir. Soğutma kulelerine sıcak su genellikle üst kottan giriş sağlar. Bu nedenle pompaya bir ekstra direnç sağlar. Bu değere basma yüksekliği denir. Ayrıca fıskiyenin de oluşturacağı basınç kaybı değeri de pompa seçimlerinde hesaba katılmalıdır.

Sıcaklık Farkı;

Kuleye giren su ile çıkan su arasındaki sıcaklık farkıdır.

Su Yükü;

Dolgu üzerine püskürtülen suyun, 1 metrekaredeki debisinin tanımıdır. Genellikle

$m^3/h.m^2$ birimi ile kullanılır.

Kuru Termometre Sıcaklığı;

Normal bir termometre ile yani haznesinin etrafı kuru olup hava ile temas halinde olan bir termometre ile ölçülen hava sıcaklığına denir. (Türk Tesisat Mühendisleri Derneği, 2007)

Yaş Termometre Sıcaklığı;

Haznesinde ıslak bir bezle sarılı termometrenin, normal hava akımı sağlanıp, hazne etrafındaki hava doygunluk sınırına getirildiğinde termometrenin gösterdiği sıcaklıktır. (Türk Tesisat Mühendisleri Derneği, 2007)

1.2.3. Mekanik terimler

Havuz;

Genellikle soğuk suyun depolandığı kısma denir. Ancak çapraz akışlı kulelerde iki tip havuz bulunur. Bunlardan biri zemindeki soğuk su havuzudur. Diğeri ise dolguların üzerindeki sıcak su dağıtım havuzudur.

Hücre;

Giriş ve çıkışı ortak olan diğer kulelerden bağımsız en az bir aksiyal fanı motoru, su dağıtım hattı vb. ekipmanları bulunan soğutma kulesine denir. Bir hücre iki veya üç fanla da sürülebilir.

Santrifüj Fan;

Radyal fan olarak da adlandırılır. Salyangoz şeklindeki fanlar genellikle kulenin alt kısmında ihtiyaç duyulan hava debisinin sağlanmasında kullanılır.

Kasetleme;

Soğutma kulesinin dış yüzeyini kaplayan değişken malzemelerde kasetlere denir. Çelik türevleri ve termoplastik türevleri kullanılabilir.

Toplama Havuzu;

Soğutma kulelerinde soğuyan suyun biriktirildiği yerdir.

Sıcak Su Dağıtım Havuzu;

Özellikle çapraz akışlı soğutma kulelerinde sıcak su dağıtımı sıcak su dağıtım havuzlarında biriktirilir. Sıcak su sonrasında dolguların üzerine spreylenir.

Sıcak Su Dağıtım Sistemi;

Soğutulması istenen suyun dolguların üzerine dağıtımı sırasında kullanılan mekanik sisteme denir. Borulardan ve fıskiyelerden oluşur.

Damla Tutucular;

Havaya karışıp sürüklenen su damlacıklarının kuleden çıkmadan önce toplanıp sisteme geri döndürüldüğü ekipmanlardır.

Fan Bacası;

Aksiyal fan kullanılan soğutma kulelerinde aksiyal fanın bağlandığı dairesel boğaza denir.

Dolgu;

Dolgular ısı ve kütle transferinin yüksek verimlilikte yapıldığı ekipmanlardır. Havanın ve suyun kendilerine ait yolları bulunur. Çok farklı çeşitte dolgu tasarımları bulunur.

Redüktör;

Motorun devrini düşürüp fana aktaran ekipmanlardır. Dişli kutusu da denir.

Panjur;

Soğuk ve kuru havanın üniteye girdiği bölgeye denir. Güneş ışınlarına karşı soğutma kulesini koruyarak biyolojik koruma sağlar, Rüzgar efektlerinden soğutma kulesini korur. Zemin kotundaki ses seviyesini azaltır. Soğutma kulesine atmosferden yabancı partikül girmesini engeller.

Fıskiye;

Sıcak suyu dağıtım sistemleri ile birlikte dolgu üzerine dağıtan ekipmanlardır. Genellikle termoplastik malzemelerden plastik enjeksiyon metoduyla imal edilirler.

Davlumbaz;

Güverte ile damla tutucu arasındaki bölüme denir. Havanın rahat bir şekilde bacalardan atılması için kullanılır.

1.3. Soğutma Kulesi Çeşitleri

Endüstride gerek karlılığı artırması için gerek daha çevreci yapılar yapmak için gerekse verimlilik odaklı çokça soğutma kulesi tasarımı denenmiştir. Ne yazık ki yapılan gelişmeler bir tarafı geliştirirken diğer taraftan eksikler meydana getirerek %100 doğru yapının oluşmasını engellemiştir. Bu durum endüstride soğutma kulesi yönünden çeşitliliği beraberinde getirmiştir. İşletme giderlerini artıran bir uygulama çeşidinin çok düşük yatırım maliyeti varken, işletme giderini minimuma indirdiğimizde ise yatırım maliyetleri çok artmaktadır. Bu ikisini minimuma indiren çözümlerde ise talep edilen performansı elde etmek için gerekli alan çok fazla olduğu için kurulum problemleri oluşmaktadır. Bu nedenle soğutma kulelerinde her zaman çok fazla seçenek ve çok fazla uygulama çeşidi bulunmaktadır.

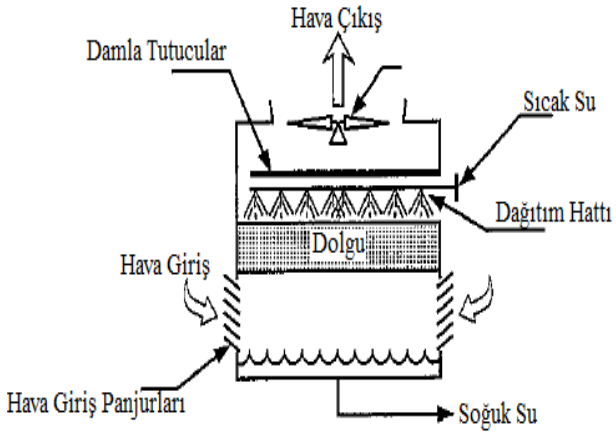
1.3.1. Hava çekiş tipine göre soğutma kuleleri

Özellikle kullanılacağı endüstri dolasıyla soğutma kulelerinin işletme giderleri ciddi bir problem yaratabilmektedir. Ya da oturma alanlarındaki kısıtlamalar veya limitler nedeniyle dar alanlarda soğutma kuleleri kurulması gerekebilir. Mekanik ve doğal çekişli soğutma kulelerinin birbirleri üzerinde çokça üstünlüğü bulunmaktadır. Genellikle soğutma performansı ve işletme giderleri bu üstünlüklerin en önemlilerindendir (SPX Cooling Technologies, 2009).

1.3.1.1. Mekanik çekişli soğutma kuleleri

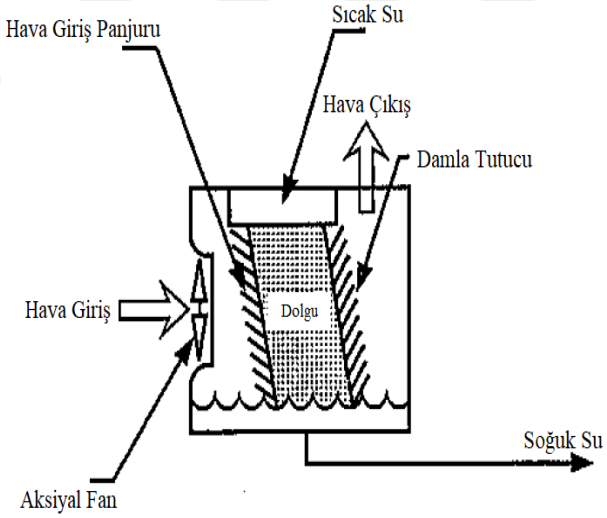
Çok farklı tasarımlarda evaporatif soğutma metotları ve çok farklı tasarımlarda soğutma kuleleri bulunmaktadır. Hava çekiş şekline göre doğal ve mekanik çekişli olarak ikiye ayrılırken mekanik çekişli soğutma kuleleri de fanın konumuna göre kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadırlar.

Cebri çekişli soğutma kulelerinde fan soğutma kulesinin hava atış bölümünde bulunur. Gerek bulunduğu bölge vasıtasıyla daha çok aksiyal tip fanların kullanımına uygundur. Hava, soğutma kulesine panjurlardan giriş yaparak yükselir ve kulenin çıkışında bulunan fan veya fan gruplarından nemli ve entalpisi yüksek şekilde atılır. Şekil 1.2'de örnek bir aksiyal fanlı cebri çekişli soğutma kulesi verilmektedir.



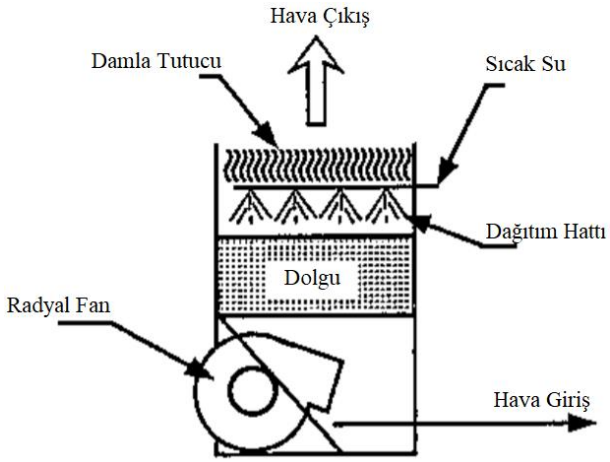
Şekil 1. 2. Aksiyal Fanlı Mekanik Çekişli Soğutma Kulesi

Aksiyal fanlı cebri itişli soğutma kulelerinde fan soğutma kulesinin hava girişinde bulunmaktadır. Atmosfer havası direkt olarak aksiyal fan üzerinden giriş yaparak yükselir ve kulenin çıkışında bulunan damla tutuculardan sonra atmosfere atılır. Şekil 1.3'de örnek bir aksiyal fanlı cebri itişli soğutma kulesi bulunmaktadır.



Şekil 1. 3. Aksiyal Fanlı Cebri İtişli Soğutma Kulesi

Radyal (Santrifüj) fanlı cebri itişli soğutma kulelerinde fan soğutma kulesinin hava girişinde bulunmaktadır. Atmosfer havası direkt olarak radyal fan üzerinden giriş yaparak yükselir ve kulenin çıkışında bulunan damla tutuculardan sonra atmosfere atılır. Şekil 1.4'de örnek bir radyal fanlı cebri itişli soğutma kulesi gösterilmektedir.



Şekil 1. 4. Radyal Fanlı Cebri İtişli Soğutma Kulesi

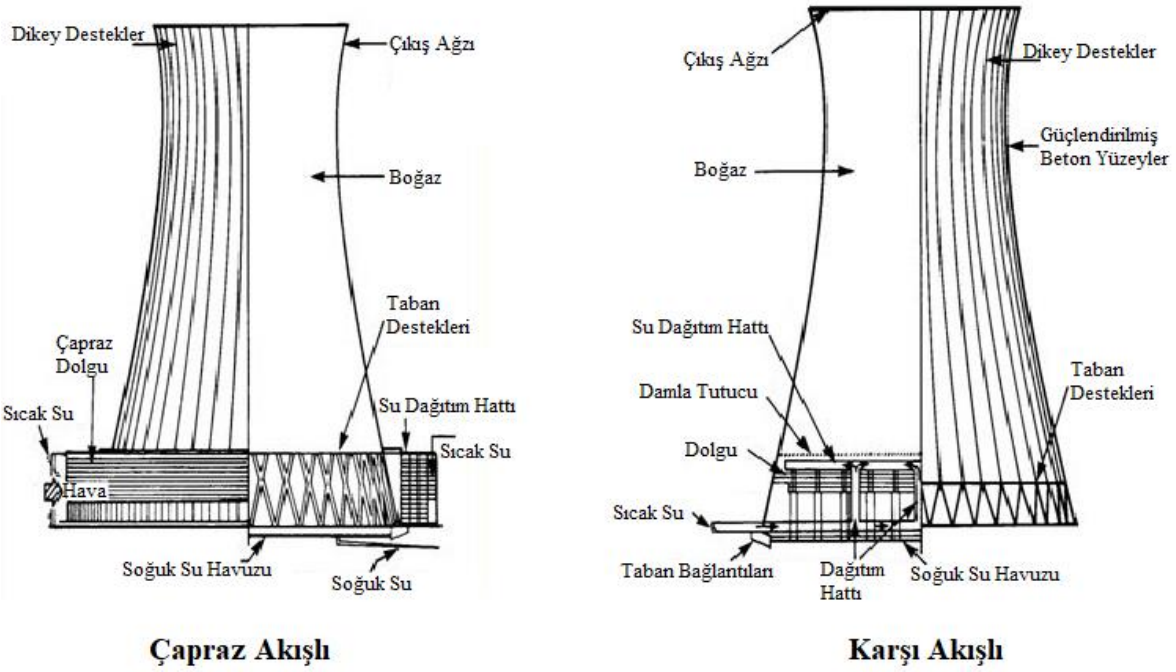
Mekanik çekişli soğutma kulelerinin ortam şartlarından (yağmur, rüzgâr, vs.) etkilenme hassasiyeti çok azdır. Bunun nedeni, mekanik çekiş sayesinde oluşturulan yüksek basınç farkları dolayısıyla hava debisindeki dalgalanmalar minimuma iner. Soğutma kulesinin performansı sirküle edilen hava debisi ile direkt etkili olduğu için de performansları genel olarak değişmez. Isı yükündeki değişime göre fan devri ayarlanıp kullanım esnekliği sağlanabilir. Bu sayede soğuk su sıcaklığı sürekli sabit tutulabilir. Doğal çekişli kulelere kıyasla çok daha az yer kaplayan tasarımlara sahiptirler.

Bunların aksine mekanik grubu ciddi enerji tüketim kaynağıdır. Enerji tüketiminin yanında bakım giderleri de bulunmaktadır. Bu sayede doğal çekişli kulelerinin aksine yüksek düzenli işletme giderleri bulunmaktadır.

Özetle mekanik çekişli soğutma kuleleri yatırım maliyeti düşük, işletme maliyeti yüksek çözümler sunmaktadır. Kullanım kolaylığı açısından da doğal çekişli kulelere üstünlük sağlamaktadır.

1.3.1.2. Doğal çekişli soğutma kuleleri

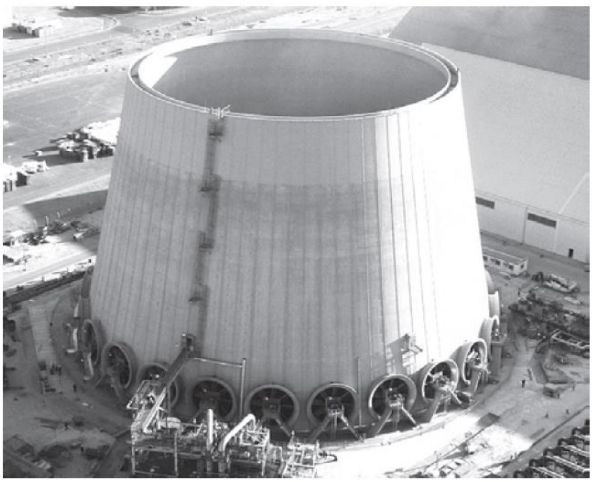
Doğal çekişli soğutma kulelerinde ısı ve kütle transferinde baş rolü oynayan hava debisi ünite giriş ve çıkışlarındaki havanın yoğunluk farkından yararlanılarak elde edilir. Soğutma kulesinin girişindeki hava, kuru ve soğuk iken çıkışındaki hava mekanik çekişli kulelerdeki gibi nemli ve sıcaktır. Mekanik çekişli kulelerdeki gibi çapraz ve karşı akışlı dolgu tasarımları mevcuttur. Şekil 1.5'de çapraz ve karşı akışlı doğal çekişli soğutma kulelerinin genel yapıları gösterilmektedir.



Şekil 1. 5. Çapraz ve Karşı Akışlı Soğutma Kuleleri

Modern betonarme doğal çekişli kulelerinin tasarımı genel olarak hiperbolik olmaktadır. Bu sayede aynı soğutma kapasitesini daha küçük yapılarla sağlamak mümkün olmaktadır.

Doğal çekişli soğutma yapımındaki ana amaç işletme giderlerinin minimuma indirilmesidir. Lakin endüstride soğuk su sıcaklığını daha da düşürmek için mekanik cebri itişli soğutma kuleleri de kullanılmaktadır. Bu tip soğutma kulelerinde doğal çekişli soğutma kulesinin hava debisi artırılarak performans artışı sağlanmaktadır. Şekil 1.6'de fan destekli doğal çekişli soğutma kulesi genel görünümü verilmektedir.



Şekil 1. 6. Fan Destekli Doğal Çekişli Soğutma Kulesi

Doğal çekişli soğutma kuleleri genellikle uzun yıllar sürecek yatırımlarda kullanılır. Bu nedenle özellikle enerji santrallerinde bu tip soğutma kuleleri kullanılır. Sürekli çalışan tesiste çalıştığı her bir saat mekanik çekişli soğutma kulesine kıyasla daha düşük enerji sarfiyatı nedeniyle işletmeye maliyetleri düşüktür.

Bu tip soğutma kulelerinin temel dezavantajı ise iklim şartlarından etkilenip performans dalgalanmaları yaşatma riskidir. Bu nedenle gerek ülkemizde gerek yurtdışında acil durumlara yönelik doğal çekişli soğutma kuleleri mekanik çekişli soğutma kuleleri ile yedeklenmektedirler. Bu sayede tesiste herhangi bir soğutma performansı düşüşüne karşı oluşabilecek üretim kaybı mekanik çekişli soğutma kuleleri ile giderilebilmektedir.

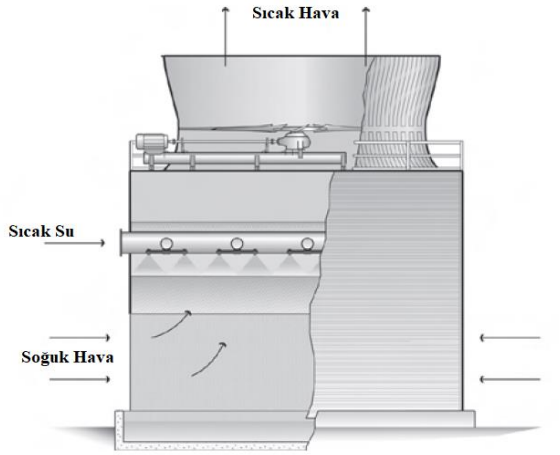
1.3.2. Akış tipine göre soğutma kuleleri

Soğutma kuleleri akış tipine göre çapraz akışlı ve karşı akışlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Daha önceki maddelerde de bahsedildiği üzere bu iki dizayn tipi işletme taleplerine göre, iklim etkisi, işletme kolaylığı, yatırım maliyeti ve verim gibi etkenlere bağlı olarak tercih edilir. Ayrıca bu tip durumlarda çapraz akışlı ve karşı akışlı kulelerin birbirleri üzerlerinde avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

1.3.2.1. Karşı akışlı soğutma kuleleri

Bu tip soğutma kulelerinde atmosfer havası ünite içerisine ünitenin alt kotunda bulunan panjurlardan giriş yapar. Sonrasında yatayda iki tarafı akışa kapalı fakat dikeyde iki tarafı açık olan dolgudan aşağıdan yukarıya doğru hareket eder. Karşılaştığı dirençler yani geçtiği bölgeler sırasıyla hava giriş panjuru, yağmurlama bölgesi, dolgu bölgesi, spreyleme bölgesi, su dağıtım hattı, damla tutucu bloklar ve aksiyal fanın giriş kısmından oluşmaktadır. Bu bölgelerin sadece yağmurlama, dolgu ve spreyleme bölgelerinde ısı ve kütle transferi yapılmaktadır. Diğer bölgelerin görevleri soğutma kulesinin sürekliliğinin sağlanması içindir.

Aşağıda Şekil 1.7'de cebri çekişli aksiyal fanlı bir karşı akışlı soğutma kulesinin genel çalışma prensibi gösterilmektedir. Detay özellik olarak panjur, dolgu blokları ve damla tutucular farklı bölgelerde olduğu için toplam basınç kayıpları çapraz akışlı soğutma kulelerine kıyasla bir miktar daha fazla olmaktadır.



Şekil 1. 7. Karşı Akışlı Soğutma Kulesi

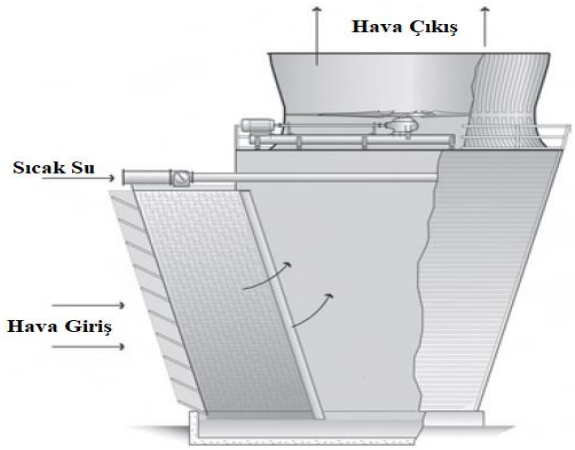
1.3.2.2. Çapraz akışlı soğutma kuleleri

Çapraz akışlı soğutma kuleleri havanın ünite içerisine yanlardan girip parabolik bir yol izleyerek üstten çıktığı bir yapıya sahiptir. Yeni nesil çapraz akışlı soğutma kule dolguları içeriğinde hem damla tutucu, hem panjur hem de soğutucu dolgu aynı blok içerisinde bulundurmaktadır. Bu sayede ürün daha kolay bir yapıya sahip olmaktadır. Karşı akışlı kulelerin tamamında her biri için ayrı bölgeler ve belli sistemler bulunmaktadır.

Atmosfer havası yanlardaki hava giriş panjurlarından üniteye giriş yaptıktan sonra sırasıyla dolgu ve damla tutucudan geçip aksiyal fan vasıtasıyla ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Buradaki dolgunun temel özelliği hem yatayda hem de dikeyde akışkan geçişine müsait olmasıdır. Sıcak su yukarıdan aşağıya hareket ederken atmosfer havası ise dışarıdan içeriye doğru hareket eder.

İşletmelerde en önemli tercih sebeplerinden biri mekanik ekipmana ulaşımın kolay olması nedeniyle bakım onarım kolaylığı sağlamasıdır. Suyun izlediği yol ile havanın izlediği yol arasında herhangi bir ilişki de olmadığı için, sonuçta bir akışkan yatayda bir akışkan dikeyde hareket etmektedir, çok düşük enerji tüketimli ürün tasarımları mümkün olmaktadır.

Aşağıda Şekil 1.8'de cebri çekişli aksiyal fanlı bir çapraz akışlı soğutma kulesinin genel çalışma prensibi gösterilmektedir. Bazı çapraz akışlı tasarımlarda alan kısıtlamalı nedeniyle sadece tek taraftan hava emişi sağlanırken bazılarında da her iki taraftan da hava emişi sağlanabilmektedir.



Şekil 1. 8. Çapraz Akışlı Soğutma Kulesi

1.4. Soğutma Kulesi Ekipmanları

Soğutma kuleleri çok fazla dizayn çeşitliliğine sahip üniteler olsalar da genel olarak kullanılan ekipmanlar belirlidir. Bu ekipmanların yerleri dizayn çeşidinden çeşidine değişiklik gösterdiği için farklı bir ürün izlenimi yaratır. Bir ünitenin soğutma kulesi olabilmesi için direkt evaporatif veya dolaylı evaporatif soğutma prensibine göre ısı ve kütle transferi yapması gerekir. Bunun için de proses suyunun atmosfer havası veya ikincil bir su devresinin verimli bir şekilde atmosfer havası ile etkileşim halinde olması gerekmektedir.

1.4.1. Yapısal ekipmanlar

1.4.1.1. Soğuk su toplama havuzu

Soğutma kulelerinde spreyleme, dolgu ve yağmurlama bölgelerinden sonra soğuk su havuzda toplanır. Havuz, soğutma kulesindeki en basit kısımlardan biri gibi gözükse de soğutma kulesinin yönetimi aslında havuzdan yapılır.

Bilindiği üzere soğutma kuleleri kütle transferi ile ısı transferinin birlikte suyun soğutulduğu endüstriyel ünitelerdir. Kütle transferi nedeniyle su miktarı soğutma kulesi çalıştığı sürece buharlaşarak azalacaktır. Azalan su içeriğindeki mineraller artacaktır, pH seviyesi yükselecektir, iletkenliği düşecektir, atmosferle direkt iletişimde olan su fiziksel olarak kirlenecektir. İşletme durumundaki sıkıntıları ortadan kaldırmak ve durumu kontrol altına almak için havuzda temel bazı ekipmanlar kullanılmaktadır.

Taze Su Besleme Şamandırası

Genel olarak soğutma kulelerindeki çevrim suyunun %1 - %3 arası devamlı olarak buharlaşmaktadır. Şekil 1.9'de gösterilen toplu şamandıralar sayesinde su seviyesi düzenli olarak aynı seviyede tutulurken kaybedilen suyun düzenli olarak soğutma kulesine de eklenmesi sağlanır.

Yeni nesil bazı soğutma kulelerinde havuz su seviyesi kontrolü elektromekanik sistemler vasıtasıyla da yapılmaktadır. Şekil 1.10'de elektronik su seviye kontrol cihazının kilit ekipmanı gösterilmektedir. Bu tip cihazlar sayesinde su seviyesi solenoid bir vana yardımıyla milimetrik olarak istenilen seviyede tutulabilir.



Şekil 1. 9. Taze Su Besleme Şamandırası



Şekil 1. 10. Seviye Kontrol Cihazı

Elektrikli Isıtıcı

Kış mevsiminin çok soğuk geçtiği bölgelerde de soğutma kuleleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl yükteki dalgalanmalardan veya dış ortam sıcaklığındaki sert düşüşler soğutma kulesinin suyu fazla soğutmasına neden olabilir. Bu fazla soğutma sonrasında soğutma kulesinde geri dönüşü olmayan tahribat oluşabilir. Aşağıda Şekil 1.11'de donmuş bir soğutma kulesi gösterilmektedir.

Soğutma kulelerinde bu tip durumların oluşmaması için çokça metot vardır. Bu metotlardan en sık kullanılanlarından biri, soğutma kulelerinde elektrikli ısıtıcılar kullanılmasıdır. Şekil 1.12'de elektrikli ısıtıcının genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1. 11. Donmuş Bir Soğutma Kulesi



Şekil 1. 12. Elektrikli Havuz Isıtıcısı

Bu tip üniteler sayesinde havuzlardaki suyun donması engellenmektedir. Dış ortam sıcaklığına ve havuz hacmine göre kullanım miktarları ve güçleri değişmektedir.

Otomatik Blöf Sistemi

Otomatik blöf sistemi sayesinde soğutma kulesnde buharlaşma sonucunda düşen su iletkenlik değerinin belli bir değerin üzerinde tutulması sağlanır. Temel olarak sistemde 3 ekipman bulunur. Bunlar iletneklik ölçüm probu, solenoid valf ve kontrol ünitesidir.

Suyun iletkenlik seviyesi sürekli olarak ölçülür. İşletmeye göre belli bir değerin altına düştüğü an kontrol ünitesi vasıtasıyla solenoid valfe açıl komutu gönderilmesi sağlanır. Solenoid valften bir miktar su boşaltılır, bu sayede su seviyesi düşer ve taze su besleme hattından soğutma kulesi su seviyesi sabit kalması sağlanır.

Kimyasal Dozaj Ünitesi

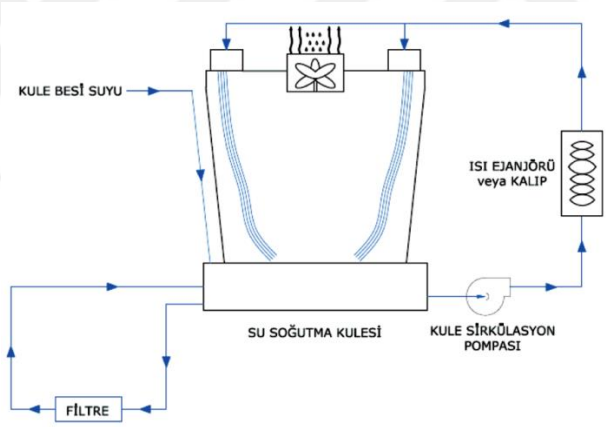
Soğutma kuleleri, sıcak ve nemli çalışma koşulları nedeniyle bakteri üremesi için uygun koşullar oluşturmaktadır. Soğutma kuleleri ve buharlaşmalı kondenserlerden kaynaklanan aerosollerin uzun mesafelere taşınabildiği ve hastalığa neden oldukları bilinmektedir (Küçükyalı, 2001).

Gerek ünite performansının kontrol edilebilmesi gerekse etrafa hastalık yayılmaması için soğutma kuleleri kimyasal ve biyolojik olarak kontrol altında tutulmaları gerekmektedir. pH değerinin işletmeye göre belirli değerlerin üzerine çıkmaması için bir miktar asit dozlanırken biyolojik olarak da kontrol edilebilmesi için düzenli aralıklarla özel kimyasalların dozlanması gerekir.

Filtrasyon Ünitesi

Soğutma kulesinin çalışma prensibinde, sistemden ortamdan uzaklaştırmak istenilen ısı yükü, kuleye giriş sıcak suyu bağlantısı ile gelir ve kule içinde suyun direkt evaporatif ısı transferi ile bu sistemde ihtiyaç olmayan ısı ortama atılır. Bu işlem soğutma kulesinde taze hava ile yapılır. Havanın tedariği çoğu zaman mekanik çekişli sistemler kullanılarak yapılır, ancak çok yüksek kapasiteli soğutma kulelerinde doğal çekişli inşaii sistemler ile havanın kuleye gelmesi sağlanır. Bölgenin fiziksel koşuluna, mevsime ve çevre kirliliği durumuna göre soğutma kulesine gelen hava bünyesinde az veya çok miktarda katı partikül bulunur. Soğutma kulesindeki hava ile su direkt temas halinde olduğundan hava içindeki partiküllerin bir kısmı soğutma suyu içine geçiş yapabilir (Burkut, 2010).

Şekil 1.13'de soğutma kulelerindeki filtrasyon sistemine dair bir örnek gösterilmektedir. Soğutma suyunun tamamı ilgili soğutma uygulaması için kullanılırken bir kısmı da düzenli olarak filtre edilerek sistemin kirliliğinin engellenmesi için kullanılır.

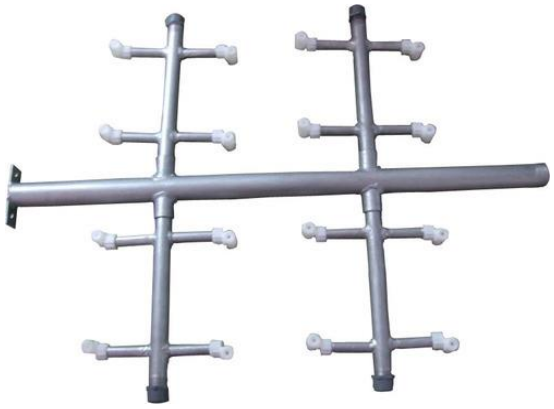


Şekil 1. 13. Soğutma Suyu Servis Hattı Filtrasyonu Sistemi

1.4.1.2. Su dağıtım sistemi

Su dağıtım sistemi çevrim suyunu homojen olarak dolguların üzerine dağıtmakla görevli ekipmanlardır. Bu ekipmanlar başlıca ana dağıtım boruları, ara dağıtım boruları, vanalar ve spreyleme nozullarıdır.

Dağıtım borularının görevleri ana sistemden gelen çevrim suyunun daha düşük debilerde soğutma kulesinin hemen her yerindeki fıskiyelere iletilmesinin sağlanmasıdır. Şekil 1.14'de örnek bir su dağıtım sistemi gösterilmektedir.



Şekil 1. 14. Su Dağıtım Sistemi

Sprey nozulları yani fıskiyeler ise genel olarak belli basınçlarda belirli debileri dağıtmakla görevli ekipmanlardır. Genel olarak PP malzemeden yapılan fıskiyeler özel uygulamalarda paslanmaz çelik malzemelerden de yapılabilir. Şekil 1.15'de bazı örnek fıskiye tasarımları bulunmaktadır.



Şekil 1. 15. Soğutma Kulesi Fıskiye Örnekleri

1.4.1.3. Fan bacası

Genellikle aksiyal fanlı cebri çekişli soğutma kulelerinde fan bacası kullanılır. Cebri itişli ve doğal çekişli soğutma kulelerinde fan bacası kullanılmaz. Özellikle fan performansını maksimum verimlilikte kullanabilmek açısından fan bacasının tasarımı çok önemlidir. Fan emişinde ve fan atışında radüsler kullanılması performans artışları sağlanması açısından önemlidir. Şekil 1.16'de örnek bir fan bacası gösterilmektedir.



Şekil 1. 16. Fan Bacası

Fan bacasının çok yüksek veya çok alçak olması performans kayıplarına yol açacak negatif etkiler doğurur. İdeal fan bacasında fan, bacanın tam ortasında bulunmalıdır. Fanın üzerinde ve altında da fan çapının minimum %5'i kadar boşluk bırakılmalıdır.

1.4.1.4. Soğutucu dolgu

Soğutma kulelerinde genel ihtiyaca yönelik çokça dolgu tipi bulunmaktadır. PVC ve PP filmlerden yapraklarından oluşturulan bloklar, kirli sular için üretilen sıçratma tipi dolgular bunlardan bazılarıdır. (A.E. Özgür, 2006).

PVC veya PP film yapraklarından oluşan film tipi dolgularda iki dolgu yaprağı arası genel olarak 12 mm'den 35 mm'ye kadar değişkenlik göstermektedir. Formun açısı ve yapraklar arası mesafe direkt olarak performansa ve dirence etki etmektedir. Örnek bir film tipi dolgu elemanı şekil 1.17'de gösterilmiştir (A.E. Özgür, 2006).

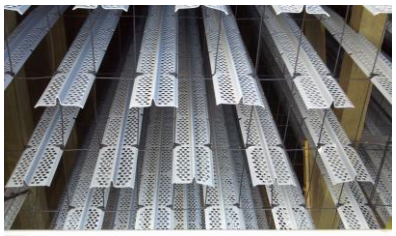
Sıçratmalı tip dolgularda, suyun dolgular üzerinden sıçratılarak daha küçük damlacıklara dönüşmesi ve daha uzun sürede havuza ulaşmasını sağlanması hedeflenir. Genel olarak kirli su uygulamalarında kireç oranı yüksek sularda ve tuzlu sularda kullanılır. Şekil 1.18

da örnek bir sıçratmalı dolgu elemanı gösterilmiştir (A.E. Özgür, 2006).

Sıçratma tip dolgulara bir örnek de bigudi tip dolgulardır. Üretimi kolay ve performansı yüksek olduğu için bu tip dolgular sık sık kullanılmaktadır. Örnek bir bigudi dolgu şekil 1.19'de gösterilmiştir (A.E. Özgür, 2006).



Şekil 1. 17. Film Dolgu



Şekil 1. 18. Sıçratmalı Dolgu



Şekil 1. 19. Bigudi Dolgu

1.4.1.5. Damla tutucu

Soğutma kuleleri içerisinde hava tarafından sürüklenecek kadar küçük su damlacıklarının fan bacasından atılmaması için kullanılan ekipmana damla tutucu denir. Damla tutucular genel olarak sinüzoidal dalga şeklinde üretilmektedirler. Bunun sebebi merkezkaç kuvveti ile su zerreciklerinin damla tutucu duvarlarında biriktirilerek soğutma kulesine geri dökülmesini sağlamaktır. Şekil 1.20'de damla tutucu örnekleri gösterilmektedir (Joseph K. Chan, 1977).

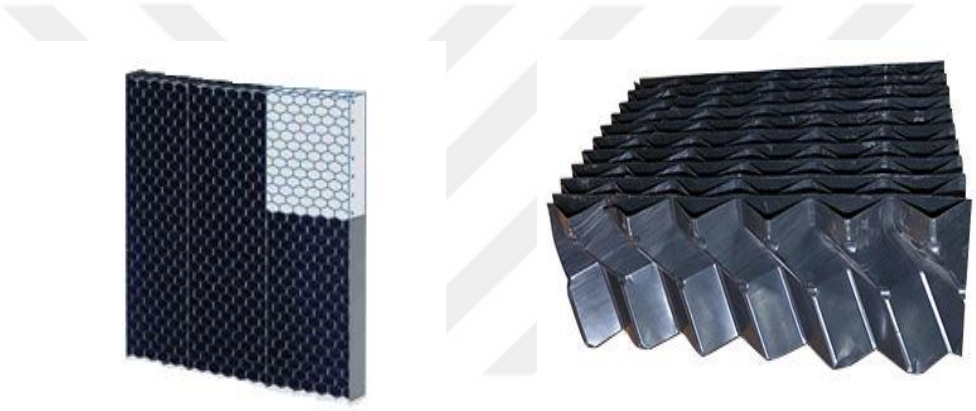


Şekil 1. 20. Damla Tutucular

Damla tutucular sayesinde ilk olarak çevrim suyunun sürüklenme kaybı ile çevrimi terk etmesi engellenir. Su tüketimini düşürmek açısından bu kısım önemlidir. Durum kimyasal olarak ele alınırsa gereksiz kimyasal malzeme kaybını azaltır. Çevreye kimyasal malzemenin yayılmasını engeller. Damla tutucular sayesinde, biyolojik bakımı yapılmayan soğutma kulelerinin çevreye lejyoner hastalığı yayması riski azalır.

1.4.1.6. Hava giriş panjuru

Soğutma kulelerindeki buharlaşma dışındaki su kayıplarından biri de hava giriş panjurlarından olabilmektedir. Şekil 1.21'de karşı akışlı soğutma kulelerinde kullanılan bir hava giriş panjur tipi gösterilmektedir (VDI, 2010).



Şekil 1. 21. Hava Giriş Panjurları

1.4.1.7. Dış kaplama ve taşıyıcı yapı

Dış kaplama ve taşıyıcı malzemeler, soğutma kulesinin performansından yanısıra ömrü açısından en çok dikkat edilmesi gereken yerlerinden biridir. Soğutma kulesi çalıştığı süre içerisinde ortam sıcaklığının üzerinde nemli bir bölge oluşturacaktır. Kışın dış ortam 0 °C'nin altında da olsa soğutma kulesinin iç ortamı çalışma şartlarına göre 20 – 50 °C bandında olacaktır. Sistemin kimyasal girdileri, kir ve güneş ışığı gibi diğer etkilerden doğan mikrobiyolojik organizmaları ve oksijenle suyun bir arada ortama kattığı korozyonu da düşündüğümüzde soğutma kulesinin aktif ömrünü belirleyen kısım imalatında kullanılacak kaplama ve taşıyıcı malzemelerdir (Cooling Technology Institute, 2017).

Temel olarak kullanılan malzemeler ahşap, dayanımı artırılmış ahşap, asbest paneller, camelyaf takviyeli polyester, termoplastik malzemeler, çelik türleri ve betondan soğutma kuleleri yapılmaktadır.

Günümüze bakıldığında ahşap ve türevleri malzemeler kısa ömür nedeniyle nadir kullanılmaktadır. Malzeme olarak ucuz ve sağlıklı olması bu ürünün en önemli avantajıdır. Asbest paneller insan sağlığına ve çevreye çok zararlı olduğu için hemen hemen kullanımı ortadan kalkmıştır. Termoplastik malzemeler camelyaf takviyeli polyestere kıyasla pahalı kaldığı için işletmeciler tarafından tercih edilmemektedir.

Günümüzde en çok kullanılan soğutma kulesi malzemelerinin başında camelyaf takviyeli polyester kuleler görülmektedir. Bunun nedeni ise korozyona olan yüksek dayanımı ve üretim kolaylığı / ucuzluğu gelmektedir. Özellikle inşaii tip kulelerde yani ağır endüstride ise beton tip malzemeler bu trendi takip etmektedir. Şekil 1.22'de camelyaf takviyeli bir soğutma kulesi ve Şekil 1.23'de ise betonarme bir doğal çekişli soğutma kulesi gösterilmektedir. İklimlendirme ve soğutma sektöründe ise genel olarak çelik kulelere eğilim yüksektir. Gerek görüntü olarak diğer tiplere kıyasla daha şık olması gerekse üretim kolaylığı açısından çelik kuleler bu sektörde bir adım önde bulunmaktadırlar. Şekil 1.24'de çelik soğutma kulesi verilmektedir.



Şekil 1. 22. Camelyaf Takviyeli Polyester Soğutma



Şekil 1. 23. Betonarme Soğutma Kulesi

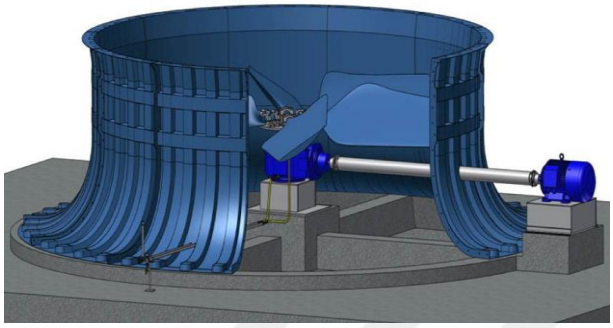


Şekil 1. 24. Çelik Soğutma Kulesi

1.4.2. Elektrik ve mekanik ekipmanlar

Doğal çekişli soğutma kuleleri dışındaki hemen hemen tüm soğutma kuleleri hava akışını sağlamak için elektrik ve mekanik ekipmanlara ihtiyaç duymaktadırlar. Fanın

döndürülmesi için belli bir hız ve tork ihtiyacı bulunmaktadır. Motorun hızının ve torkunun belirli hız düşürücü ekipmanlar kullanarak fana aktarılması gerekir. Şekil 1.25'de genel olarak soğutma kulelerinde kullanılan bir elektrik / mekanik ekipman grubu gösterilmektedir.



Şekil 1. 25. Soğutma Kulesindeki Elektrik ve Mekanik Ekipmanlar

1.4.2.1. Fan

Soğutma kulesi fanlarında genel olarak camelyaf takviyeli polyester, termoplastik veya alüminyum ekstrüzyon malzemeler kullanılır. Bunun temel nedeni soğutma kulesinden çıkan, atmosfere geri verilen hava, sıcak ve nemli havanın oluşturduğu korozyona dayanıklı ve aynı zamanda yeterli hava debisi ve hava direncini oluştururken de bu dinamik yüke dayanabilecek güçte olması gerekmektedir. (Cooling Tower Institue, 2011)

Genel olarak soğutma kulelerinde kullanılan fanların kanat açıları değiştirilebilir olarak seçilir. İki tip açı değiştirme metodu vardır. Biri hassas uygulamalarda otomatik açısı değişen kanat tipi, diğeri ise fanın durdurulup göbeğin gevşetilerek kanatlara elle talep edilen açıya göre ayarlanması ile yapılır. Sezonda belli aralıklarla işletme talebine göre kanat açısı değiştirilebilir. Örneğin kışın suyun fazla soğutulmaması için kanat açıları düşürülebilir (Cooling Tower Institue, 2011). Şekil 1.26'da örnek bir aksiyal fan yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 1. 26. Aksiyal Fan

Aksiyal fan göbek, kanat, bağlantı elemanları ve kapak diskinden oluşur. Kanatlar havayı kürekleyerek ortamdan uzaklaştırmaya yarayan esas ekipmanlardır. Göbek ise kanatların bağlandığı merkez ekipmandır. Ayrıca bazen direkt motorla biribirine bağlı bazense güç aktarma organlarına bağlı olarak görev yapar. Bağlantı elemanları kanatları göbeğe bağlayarak çalışma sırasında açıda değişkenlik olmamasını sağlar. Kapak diski ise merkezden bir resirkülasyon olmaması için yerleştirilir.

1.4.2.2. Güç aktarma organları

Soğutma kulelerindeki güç aktarma organları çalışacağı endüstriye ve kullanılan motor gücüne göre değişkenlik gösterebilir. Temel olarak iki tip metot bulunmaktadır.

Kayış Kasnaklı Sistemler

V kayışlar, fiber takviyeli elastomer matrisli malzemelerden imal edilmektedir. Bu nedenle V kayışların düşük basma mukavemetine yüksek çekme mukavemetine sahiptirler. Bu kayış mekanizmaları diğer güç iletimi elemanlarına göre, esneklikleri, değişken hız değişim oranlarıyla çalışabilmeleri, dişli çark mekanizmalarına oranla düşük ilk yatırım ve işletme masrafları gibi özelliklerinden dolayı uzun zamanlardır soğutma kuleleri gibi korozif ortamlarda kullanılmaktadır (Cengiz & Uçar, 2006). Şekil 1.27'de soğutma kulelerinde kullanılan bir kayış kasnak sistemi gösterilmektedir.



Şekil 1. 27. Kayış Kasnaklı Güç Aktarımı

Genellikle su ve sıcaklık dayanımı yüksek sınıfta motorlar kullanıldığı için kayış ve motor arasında daha ekonomik çözümler sunmak adına motor ve fan kasnağı soğutma kulesinin hava boşluğuna yerleştirilebilir. Bunun bir temel avantajı da saha işçiliğini ortadan kaldırmasıdır.

Dişli Redüktörlü Sistemler

Redüktörlü sistemler özellikle yüksek tork ihtiyacı olan sistemlerde kullanılır. Bunun da başlıca nedeni, yüksek torklarda fazla kayış ihtiyacı ve ilk kalkış gerilimini kaldıramayıp kayışların kopma riski gelmektedir. İklimlendirme ve soğutma sektöründe genel olarak opsiyonel olarak istenen redüktörlü sistemler ağır endüstrinin vazgeçilmezi durumundadır. Şekil 1.28'de örnek bir dişli redüktör gösterilmektedir.



Şekil 1. 28. Dişli Redüktör

Genel olarak yataklar ve dişli sistemlerden oluşan rüdüktör sistemleri radyal ve aksiyal olarak yükü iletebilmektedirler.

1.4.2.3. Elektrik motoru

Elektrik motorları elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Bu dönüşüm sırasında verilen elektrik enerjisinin hepsinin mekanik enerjiye dönüşmesi hedef alınsa dahi bir bölüm elektrik enerjisi ısıya dönüşerek motor verimliliğini düşürmektedir (Bodur, 2016).

Açık çevrim soğutma kulelerinde harcanan elektrik enerjisinin hemen hemen tamamı mekanik sistemi harekete geçiren elektrik motorundan kaynaklanır. Küçük çaplardaki fanlarla kullanılacağı zaman direkt olarak fan göbeğine de bağlandığı uygulamaları bulunmaktadır. Şekil 1.29'de örnek bir elektrik motoru görseli bulunmaktadır.



Şekil 1. 29. Elektrik Motoru

Kullanılan elektrik motorları genellikle nemli ortamlarda çalışacağı için minimum IP55 koruma sınıfında olması istenir.

1.5. Soğutma Kulesi Performansını Etkileyen Faktörler

1.5.1. Su sirkülasyon debisi

Soğutma kuleleri dizaynında en önemli değişkenlerden bir tanesi su sirkülasyon debisidir. Su sirkülasyon debisi kulenin boyutlarına, su dağıtım hattına, fıskiye tiplerine, havuz ölçülerine, borulamaya ve bu gibi diğer faktörlere direkt etki eder. Aynı soğutma kulesinde daha düşük sıcaklıklarda su elde etmek için su miktarı düşürülebilirken daha yüksek kapasite elde etmek için su miktarı artırılabilir (Cooling Technology Institue, 1998).

1.5.2. Su giriş sıcaklığı

Soğutma kulelerinde ısı değiştirme işlemi olduğu için, su giriş sıcaklığı bağımlı bir değişkendir. Bunu etkileyen nedenler ısı yükü, sirkülasyon debisi ve benzeri parametrelerdir (Cooling Technology Institue, 1998). Giriş sıcaklığının bir diğer etkisi ise soğutma kulesi malzemelerine yapacağı etkilerden kaynaklanmaktadır. Soğutma kulelerinde yatırım maliyetini azaltmak için mümkün olduğu kadar PVC ve PP malzemeler kullanılmaya çalışılır. Fakat bu malzemelerin belirli sıcaklık dayanımları olduğu için de genel olarak giriş sıcaklığının 55 – 60 °C değerini geçmesi istenmez.

1.5.3. Su çıkış sıcaklığı

Soğutma kulesinin dizaynındaki en önemli faktörlerden biri de çıkış suyu sıcaklığıdır. Hemen hemen her tip soğutma kulesinde su sirkülasyon debisi, yaş termometre sıcaklığı, ısı yükü gibi değerlere bağlı olarak direkt değişim göstermektedir (Cooling Technology Institue, 1998).

1.5.4. Sıcaklık farkı

Sıcaklık farkı, su giriş sıcaklığı ile çıkış sıcaklığı arasındaki farktır. Bu değer diğer değişkenlerdeki gibi su debisi, ısı yükü gibi değişkenlere bağımlıdır. Isı yükü sabit kalıp su debisi artırıldığında sıcaklık farkı azalırken, tam tersi durumda da artacaktır.

1.5.5. Soğutma suyunun durumu

Soğutma kulelerindeki suyun kalitesi performansta küçük de olsa bir etkiye sahiptir. Soğutma kulesinde buharlaşmaya dayalı bir ısı transferi yapıldığı için, sürekli olarak suyun içeriğindeki mineral ve tuz oranları artacaktır. Bu artış ısı transferini olumsuz etkileyeceği için soğutma kuleleri işletmelerinde belli aralıklarla blöf yapılarak sistem suyu tazelenir (Cooling Technology Institue, 1998).

Örneğin bazı soğutma kulelerinde kullanılan deniz suyu performansta ciddi düşüşlere yol açmaktadır. Bazı işletmelerde de suya karışan düşük oranlarda yağ, toz gibi dış maddeler yüzünden de performans düşüşleri oluşabilmektedir (Cooling Technology Institue, 1998).

1.5.6. Su ve hava dağılımları

Normal şartlarda en yüksek soğutma performansı dağılımın mükemmel olduğu karşı akışlı soğutma kulelerinde gözlenmektedir. Fakat suyun ve havanın dağılımı nedeniyle istenilenin yarısına kadar performans kayıpları yaşanabilir. Örneğin su dağıtım sistemi parçalı olarak tıkanmış bir soğutma kulesinde kuru alanlar oluşacaktır. Kuru alan demek ısı ve kütle transferinin yapılmadığı anlamına da gelmektedir (Cooling Technology Institue, 1998).

Aynı şekilde su dağıtımının yeterli olduğu bir soğutma kulesinde de ısı ve kütle transferi sadece havanın izlediği yolda olmaktadır. Havanın geçmediği yerlerde ısı transferi olmayacaktır.

Özetle iyi dizayn edilmiş bir soğutma kulesinde hava ile su kulenin her alanında temas halinde bulundurulmalıdır. Bunun için havanın izleyeceği yolu çok iyi tasarlamak gerekmektedir. Su dağıtımında ise kullanılan fıskiye tipinin suyu mümkün olduğunca dağıtmalıdır.

1.5.7. Buharlaşma miktarı

Direkt evaporatif soğutma nedeniyle, hava ile suyun teması sonucunda sürekli olarak su moleküllerinin bir kısmı sürekli olarak havaya karışacaktır. Buharlaşan su miktarı kadar su da soğutma kulesine besleme hattından eklenecektir. Bu eklenen suyun sıcaklığı yaş termometre sıcaklığından düşük olduğu durumlarda soğutmaya pozitif etki veya tam tersi durumlarda negatif etki gösterecektir (Cooling Technology Institue, 1998).

1.5.8. Blöf miktarı

Soğutma kulesinde blöf yapılmasının yani belirli bir miktar çevrim suyunun düzenli aralıklarla sistemden uzaklaştırılarak taze su eklenmesinin temel nedeni buharlaşma ile kaybedilen su moleküllerinin su içerisindeki çözünmüş tuz miktarını artırarak suyun iletkenlik değerini yükseltmesidir.

Düzenli aralıklarla blöf yapılmayan sistemlerde bu tuz ve mineraller yapışarak katman oluştururlar, fıskiyelerin performansını düşürürler, dolgularda katmanlar oluşturarak hava geçişini engelleyecek kadar problem yaratabilmektedirler (Cooling Technology Institue, 1998).

1.5.9. Sürüklenme kaybı

Soğutma kulelerinin hava çıkış yolları üzerine damla tutucu bloklar yerleştirilir. Kullanım amacı havada asılı kalan su damlalarını sisteme geri kazandırmaktır. Damla tutucu tasarımlarında kullanılan ekipman direkt olarak havaya direnç oluşturduğu için performansı da belli oranlarda etkilemektedir. Genel olarak damla tutucu üzerindeki hava hızının 3,5 m/s'nin altında ve su sürüklenme kaybının da toplam su debisinin %0,1'den daha az olması istenir (Cooling Technology Institue, 1998).

1.5.10. Besleme suyu miktarı

Soğutma kulelerinde su kaybı önceki maddelerde de bahsedildiği üzere buharlaşmadan, blöften ve sürüklenmeden kaynaklanmaktadır. Bu üç değerin birleşimi sonucunda da sisteme şebekeden veya kuyudan gelecek suyun sistemde oluşturacağı etki soğutma kulesinin final performansını etkileyecektir. (Cooling Technology Institue, 1998)

1.5.11. Hava debisi

Soğutma kulelerinde hava debisi direkt olarak soğutma performansını etkileyen faktörlerdendir. Tüm kule tiplerinde hava debisi ile soğutma kapasitesi doğru orantı göstermektedir (Cooling Technology Institue, 1998).

Soğutma kulelerinde hava debisini yönetmek adına genellikle ayarlanabilir açılı kanatlar kullanılmaktadır. Bu sayede kanat açıları değiştirilerek hava debisi artırılarak azaltılmaktadır. Bu hava debisindeki değişim ise kulenin soğutma kapasitesinden çok çıkış suyu sıcaklığını değiştirmektedir. Yeni nesil soğutma kulelerinde frekans kontrollü sürücüler kullanıldığı için kanat açılarını değiştirmeye gerek kalmamaktadır. Sürücüler motorun hızını değiştirerek hava debisine direkt olarak etki edebilmektedirler.

1.5.12. Yaş termometre sıcaklığı

Soğutma kulesi dizaynında ve işletmesindeki en önemli değişken havanın yaş termometre sıcaklığıdır. Bağımsız bir değişken olmakla beraber elde edilen soğuk su sıcaklığını gerek sezonsal olarak gerek günün her saatinde etkilemektedir. (Cooling Technology Institue, 1998)

1.5.13. Kuru termometre sıcaklığı

Kuru termometre sıcaklığının soğuk su sıcaklığında çok küçük etkisi vardır. Kuru termometre sıcaklığındaki değişim gerek kütlesel hava debisinde gerekse havanın entalpisinde ciddi bir değişim yaratmamaktadır. Örneğin yaş termometresi 21 °C olan bir havanın kuru termometresi 21 iken entalpisi 60,9 kJ/kg iken, kuru termometreyi 43 °C olduğunda entalpideki değişim virgülden sonraki kısımlarda yaşanacak kadar düşüktür. (Cooling Technology Institue, 1998)

Kuru termometre sıcaklığının en büyük etkisi buharlaşma kaybına direkt etki etmesidir. Giriş havasının kuru termometre sıcaklığı ne kadar yüksekse giriş havasının bünyesine alabileceği su miktarı da o kadar yüksek demektir. Eğer ki soğutma kulesinin buharlaşma kaybı değeri hesaplanırken kuru termometre sıcaklığı dikkate alınmazsa buharlaşma kaybı değeri olması gerekenin çok altında hesaplanacaktır.

1.5.14. Atmosferik basınç

Genel olarak bakıldığında atmosferik basınç değerinin termal performansta çok ciddi bir etkisi yoktur. Atmosferik basınç arttığında havanın yoğunluğu artacaktır. Fan mil güçlerinde değişimler olacaktır (Cooling Technology Institue, 1998). Hava yoğunluğu arttığında eğer ki kanat açıları değiştirilmez ise fanların hareket ettirmesi gereken hava daha da ağırlaşacaktır. Bu nedenle de yoğunlukla doğru orantılı olarak motor daha fazla zorlanacaktır. Bunun sonucunda da motor mil gücü artış gösterecektir.

1.5.15. Rakım

Rakım, atmosferik basınca olan etkisi sayesinde soğutma kulesi üzerinde dolaylı bir etki yaratmaktadır (Cooling Technology Institue, 1998). Atmosfer basıncı yeryüzünden atmosferin üst noktalarına çıkıldıkça azalır. Yükseklik ile atmosferik basınç arasındaki ilişki, rakım arttıkça oldukça hızlı düşüş gösterir. Çünkü, havanın alt katmanları üst katmanlarına oranla daha yoğundur. Rakım ile basınç arasındaki bu ilişkiden yararlanarak basınç ölçüm cihazları aracılığıyla bulunulan bölgenin yükseklik hesaplamaları yapılmaktadır. (Eken, Ceylan, Taştekin, Şahin, & Şensoy, 2005). Hava yoğunluğunun yükseklikle değişimi Tablo 1.1'de gösterilmektedir

Tablo 1. 1 Rakım Atmosfer Basıncı İlişkisi

Rakım (km)	Atmosferik Basınç (kPa)
0	101.3
1	90.0
2	79.5
3	70.0
4	61.6
5	54.0

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Soğutma kulelerinin performans ve basınç kaybı eğrileri için data kayıtları yapılırken Arnavutköy / İstanbul'da bulunan bir performans test istasyonu kullanılmıştır.

2.1. Materyal

2.1.1. Test istasyonunun özellikleri ve kullanılan ekipmanlar

Test istasyonumuzda kullanılan alanındaki ana mekanik ekipman listesi ve teknik özellikleri aşağıda madde madde belirtilmektedir.

2.1.1.1. Sıcak su hattı

Tesise ısı yükü oluşturması için maksimum 500 kW'lık ısı yükü oluşturacak bir kazan sistemi bulunmaktadır. Kazan sistemi çift brülörlü olduğu için değişken ısı yükleri sağlanması konusunda da esneklik sağlamaktadır. Kazan üzerindeki kontrol panosu sayesinde ısı yükü sabitlemesi ve sıcak suyun ortalama aralığı belirlenebilmektedir. Şekil 2.1'de sıcak su kazan ve Şekil 2.2'de ise sıcak su pompası gösterilmektedir. Toplam tesisat direnci 0,8 bar olduğu koşulda 50 m^3/h su basacak şekilde dizayn değerleri bulunaktadır.



Şekil 2. 1. Sıcak su kazanı



Şekil 2. 2. Sıcak su pompası

2.1.1.2. Plakalı tip ısı değiştirici

Plakalı tip ısı değiştirici kazandan gelen sıcak su ile soğutma kulesinden gelen su arasındaki ısı transferini yapan elemandır. Buradaki temel amaç soğutma kulesinde

atmosferle direkt temas halindeki çevrim suyunun kazan hattına karışmasını engellemektir. Şekil 2.3'de testler sırasında kullanılan plaka tipi ısı değiştiricinin resmi gösterilmektedir.



Şekil 2. 3. Plaka Tipi Isı Değiştirici Resmi

2.1.1.3. Soğutma kulesi çevrim suyu pompası

Plakalı tip ısı değiştiricinin soğuk su hattındaki suyu soğutma kulesine göndermekle görevli pompadır. Sistemimizde test yapıldığı sırada 1 asil ve 1 yedek olmak üzere 2 adet in-line tipi pompa kullanılmıştır. Maksimumda 67 – 70 m^3/h su debisine ulaşan bir su debisi çevrimi sağlanmıştır. Şekil 2.4'de inline tip soğutma kulesi pompası gösterilmektedir.



Şekil 2. 4. Soğutma Kulesi Pompası Resmi

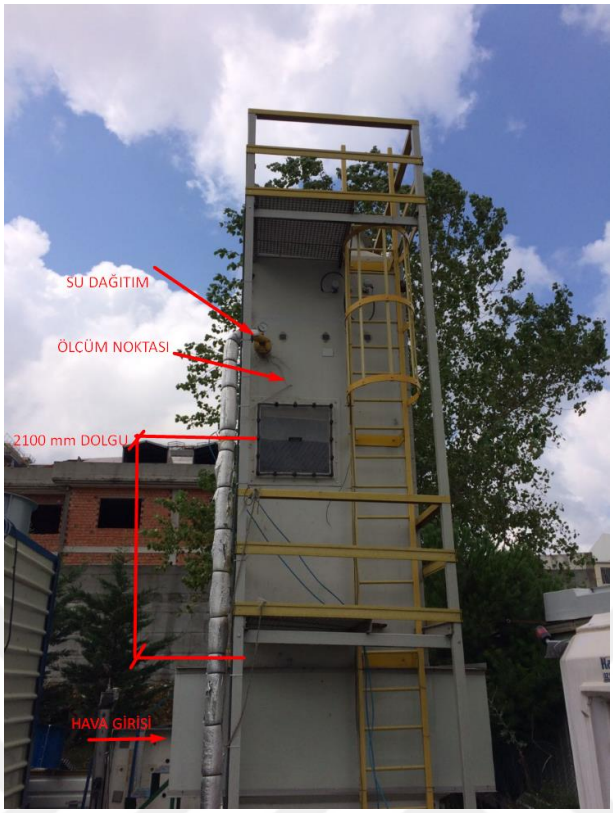
2.1.1.4. Test soğutma kulesi

Performans testleri sırasında kullanılan soğutma kulesi test amaçlı dizayn edilmiş olup farklı tipte dolguların testine olanak sağlayabilmektedir. Tablo 2.1'de soğutma kulesinde kullanılan malzemeler ve diğer özellikler verilmektedir.

Tablo 2. 1. Soğutma Kulesi Özellikleri

Dış Kaplama	Camelyaf Takviyeli Polyester
Fan Tipi	Aksiyal Fan (Üstten Çekişli)
Tahrik Tipi	Direkt Akuple Motor
Fan Kanat Malzemesi	Alüminyum
Fan Kanat Sayısı	4
Fan Çapı	1.200 mm
Fan Kanat Profili	Airfoil (Uçak Kanadı Tipi)
Motor Gücü	5,5 kW
Motor Hızı	960 d/d
Dolgu Tipi	PVC Film Tipi Dolgu
Dolgu Hatvesi	19 mm
PVC Film Oryantasyonu	60°, Çapraz
Dolgu Yükseklikleri	1500, 1800, 2100, 2400 mm
Su Dağıtım Sistemi	12 Adet Fıskiye
Kule İç Eni	1.850 mm
Kule İç Boyu	1.850 mm
Toplam Kule Yüksekliği	7.500 mm

Şekil 2.5'de performans testlerinde kullanılan soğutma kulesi deney düzeneğinin fotoğrafı gösterilmektedir. Dolgulardaki su dağıtımını izlemek ve fan ve motor dönüşünü izlemek için 2 adet sahanlığı bulunan servis merdiveni bulunmaktadır.



Şekil 2. 5. Soğutma Kulesi Deney Düzeneği

Resim üzerinde de gösterildiği üzere kulenin hava girişi alt kottan yapılmaktadır. Hava girişi seviyesinden 2.400 mm'ye kadar dolgu eklemesi yapılabilmektedir. Bunun dışında su dağıtım noktası ve örnek bir hava tarafı basınç kaybı ölçüm noktası gösterilmektedir.

2.1.2. Kullanılan Ölçüm Cihazları

Test sisteminde performans testi yapılırken sıcaklık, basınç ve debi kontrolü için cihazlar kullanılmıştır. Bu cihazlar scada sistemi ile kaydedilip detaylı analizlerin oluşturulması sağlanmıştır.

2.1.2.1. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılanlar

Testler sırasında kullanılan sıcaklık transmitterleri yüksek hassasiyete sahip ve dış ortamda kullanıma uygun olarak seçilmiştir. Tablo 2.2'de detaylı özellikleri belirtilmektedir;

Tablo 2. 2. Hava Tarafı Sıcaklık Transmitteri Özellikleri

Sıcaklık Ölçüm Aralığı	0 – 100 °C
Dalma Boyu (Ölçüm Probu)	1.000 mm
Konum	Su dağıtım hattının üzerinde
Sinyal	4 – 20 mA
Adet	2

Isı transferi su dağıtım sisteminden sonra olmadığı için hava tarafı sıcaklık ölçüm transmitterleri su dağıtım hattının üzerine yerleştirilmiştir. 2 adet olmasının nedeni ise testler sırasında biri bozulduğunda diğeri ile arasındaki ölçüm farkı oluşacaktır. Bu sayede kalibrasyonun bozulduğunun fark edilmesi sağlanacaktır. Tablo 2.3'de su tarafı sıcaklık transmitterlerinin özellikleri verilmektedir.

Tablo 2. 3. Su Tarafı Sıcaklık Transmitteri Özellikleri

Sıcaklık Ölçüm Aralığı	0 – 100 °C
Dalma Boyu (Ölçüm Probu)	60 mm
Konum	Sıcak / Soğuk su hattında
Sinyal	4 – 20 mA
Adet	2 + 2 (Toplamda 4 adet)

Su tarafındaki dalma boyunun hava tarafındakinden kısa olmasının nedeni hava kanalı 1.850 x 1.850 mm iken su hattındaki boruların DN100 ölçülerinde olmasından kaynaklıdır. Yine bir önceki ölçümdeki gibi asil ve yedekli ölçüm bulunmaktadır. Şekil 2.6'da kullanılan sıcaklık transmitterinin bir fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 2. 6. Sıcaklık Transmitteri

2.1.2.2. Hava tarafı basınç ölçüm cihazları

Fark basınç transmitteri hava tarafı basınç kaybı ölçümünde kullanılan en kritik ekipmandır. Hava hızındaki değişime göre dolgu üzerindeki fark basınç değeri, farklı noktalardan ölçüm yapılmıştır. Şekil 2.7'de fark basınç transmitteri ve Şekil 2.8'de ise pitot tüpü gösterilmektedir.

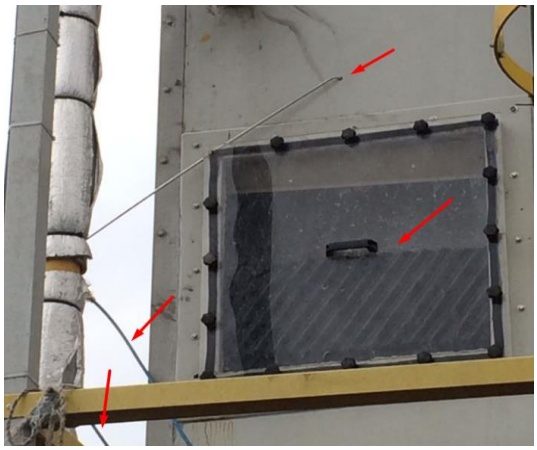


Şekil 2. 7. Fark Basınç Transmitteri



Şekil 2. 8. Pitot Tüpü

Fark basınç transmitterindeki iki uçtan biri atmosfere açık bırakılıp, diğer ucu ise dolgudan sonraki ölçüm noktasına pitot tüpü vasıtasıyla bağlanmaktadır. Şekil 2.9'da fotoğrafta ölçüm metodu daha net görülmektedir.



Şekil 2. 9. Pitot Tüpü ile Ölçüm Noktası

2.1.3. Debimetre

Soğutma kulesine giden su miktarını ölçmekte kullanılmıştır. Debimetrenin bulunduğu hattın ölçüsü DN150 olduğu için debimetrenin de giriş çıkış ölçüleri DN150'dir. Ölçümde herhangi bir hata olmaması açısından düz bir boru üzerinde ölçüm alınmıştır. Şekil 2.10'da debimetrenin bir görseli bulunmaktadır.



Şekil 2. 10. Debimetre

2.1.4. Yaş termometre sıcaklığı ölçüm cihazları

CTI kuruluşu tarafından onaylanmış yaş termometre ölçüm cihazları kullanılmıştır. Bu cihazlar sıcaklık transmitteri ve ıslak tutmak için bulunan bir hazne ile birlikte akuple çalışmaktadır. Üzerlerinde bulunan vantilatör sayesinde de sürekli olarak hava akışı sağlayarak daha net bir sıcaklık değeri elde edilmesini sağlamaktadır. Şekil 2.11'de yaş termometre ölçüm cihazı gösterilmektedir.



Şekil 2. 11. Yaş Termometre Ölçüm Cihazı

2.2. Yöntem

Soğutma kulelerinin performansını hesaplamak için birçok metot vardır. Bunlardan en bilindikleri Merkel, Poppe ve ε-NTU metotlarıdır. Bu çalışmadaki tüm hesaplamalar Merkel metodu üzerinden yapıldığı için teorik analizde Merkel yaklaşımının analizi yapılacaktır.

2.2.1. Kütle transferi hesaplamaları

Kütle transferi, dağıtılan veya püskürtülen sıcak su ile enerjisi ve nemi düşük hava arasında yapılmaktadır. Esasında bu olay tamamen psikrometrik bir işlemdir. 2.1 ve 2.2 numaralı eşitliklerinde bu işlem gösterilmektedir.

$$m_a\,(1+w)+\left(m_w+\frac{dm_w}{dz}dz\right)=m_a\left[1+(w+\frac{dw}{dz}dz\right]+mw \tag{2.1}$$

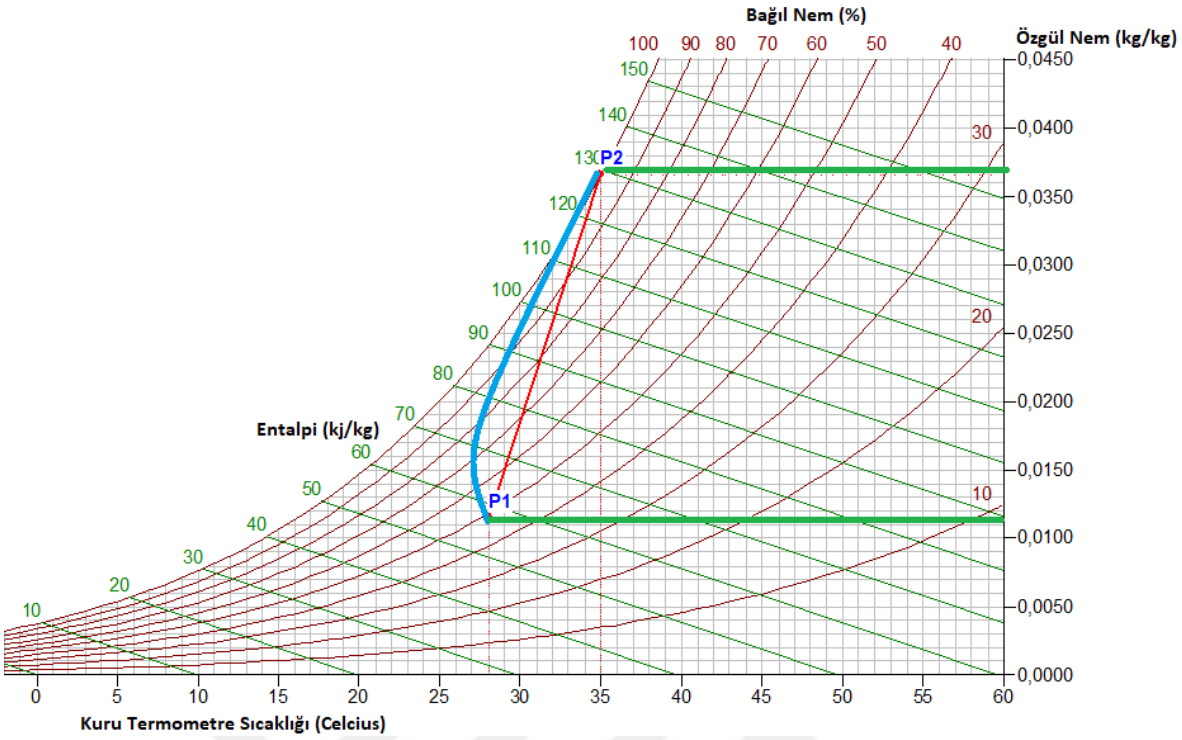
m_a = Kütlesel hava debisi (kg/s)

w = Özgül nem (kg/kg)

m_w = Kütlesel su debisi (kg/s)

$$\frac{dm_w}{dz}=m_a\,\frac{dw}{dz} \tag{2.2}$$

Bir önceki eşitlikteki durumun psikrometrik diyagramdaki hali Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Soğutma kulesine giren hava P_1 ile çıkan hava ise P_2 ile gösterilmektedir. Sadece giriş ve çıkış incelendiğinde lineer bir doğru çizilebilir. Fakat havanın izlediği yola bakıldığında bir eğri görülmektedir. Atmosfer havası ıslak ortama girdiğinde adyabatik olarak bir miktar soğurken bir miktar da evaporatif soğutma yaparak entalpisi artış gösterir. Mavi eğride bu işlem gösterilmektedir. Yatay çizgiler ise havanın içeriğindeki su miktarının yani su ile hava arasındaki kütle transferinin göstergesidir. Havaya ait psikrometrik değerler Tablo 2.4'de verilmektedir.



Şekil 2. 12. Soğutma Kulesindeki Havanın Psikrometrik Gösterimi

Tablo 2. 4. Psikrometrik Değerler

Değerler	Birim	P_1	P_2
Kuru Termometre Sıcaklığı	°C	28,0	35,0
Yaş Termometre Sıcaklığı	°C	20,0	35,0
Çiğ Noktası	°C	16,1	35,0
Bağıl Nem	%	48,5	100,0
Özgül Nem	kg/kg	0,0115	0,0366
Entalpi	kJ/kg	57,4	129,0
Yoğunluk	kg/m³	1,164	1,121

Tablo 2.4 incelendiğinde havanın tüm psikrometrik değerlerinde artış görülmektedir. Fakat bazı durumlarda kuru termometre sıcaklığının girişten daha düşük olduğu durumlar da kule dizaynına göre değişmektedir. Bağıl nemi çok düşük olan ortamlarda soğutma kulesine giren havanın sıcaklığı çıkan havadan düşük olduğu durumlar gözlenmiştir.

2.2.2. Isı transferi hesaplamaları

Islak soğutma kulelerinde temelde iki tip akışkan bulunur. Birincisi atmosfer havası, ikincisi ise çevrim suyudur. Çevrim suyunun termofiziksel özellikleri soğutma kulesi şartlarına göre çok fazla değişim görmediği için genellikle suyun özgül ısısı ve sıcaklık farkıyla toplam ısı transfer kapasitesi hesaplanabilmektedir. Hava tarafında ise parametre sayısı fazla olduğu için genellikle entalpi farkından faydalanılır. Enerji denkliği 2.3'de verilmektedir.

$$m_a h_{ma} + \left(m_w + \frac{dm_w}{dz} dz\right) c_{p_w} \left(T_w + \frac{dT_w}{dz} dz\right) = m_a \left(h_{ma} + \frac{dh_{ma}}{dz} dz\right) + m_w c_{p_w} T_w \qquad (2.3)$$

Burada;

h_{ma} = Nemli havanın entalpisi (kJ/kg)

c_{pw} = Suyun özgül ısısı (kJ/kg.K)

T_w = Suyun sıcaklığı (°C)

Eşitlik 2.3'ün basitleştirilmiş hali eşitlik 2.4'de verilmektedir.

$$m_w c_{p_w} \frac{dT_w}{dz} + c_{p_w} T_w \frac{dm_w}{dz} = m_a \frac{dh_{ma}}{dz} \qquad (2.4)$$

Eşitlik 2.2 ile eşitlik 2.4 birleştirildiğinde eşitlik 2.5 elde edilir.

$$\frac{dT_w}{dz} = \frac{m_a}{m_w} \left(\frac{1}{c_{p_w}} \frac{dh_{ma}}{dz} - T_w \frac{dw}{dz}\right) \qquad (2.5)$$

Merkel ısı ve su buharı direkt evaporatif ısı transfer eşitliklerini birleştirmiş, duyulur ve gizli ısı daha basite indirgemek için entalpi farkından faydalanmıştır. Bu teoride iki temel kabulden destek alınmıştır. Birincisi buharlaşma ile olan su kaybı yok sayılmış ve tüm sistem için Lewis sayısı ise 1'e eşit olarak kabul edilmiştir. Buharlaşma ile olan su kaybı %1 - 3 gibi bir yüzdeye sahip olduğundan birinci kabulün yapılmasında büyük bir problem yoktur. İşlem basamaklarını da basitleştirmektedir. (Sadıkoğlu, 1996)

Soğutma kulelerindeki duyulur ve gizli ısı transferi dizayn şartlarından ve atmosfer havasının termofiziksel özelliklerinden dolayı değişiklik göstermektedir. Eşitlik 2.6'da toplam ısı transfer kapasitesi verilmektedir

$$dQ = dQ_m + dQ_c \tag{2.6}$$

Q = Toplam ısı transfer kapasitesi (kW)

Q_m = Gizli ısıdan kaynaklı ısı transfer kapasitesi (kW)

Q_c = Duyulur ısıdan kaynaklı ısı transfer kapasitesi (kW)

Kütle transferine dayalı ısı transferindeki buharlaşan su miktarı eşitlik 2.7 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{dm_w}{dz} d_z = K(w_{sw} - w)_a \, dA \tag{2.7}$$

w_{sw} = Su damlasının sıcaklığındaki havanın özgül nem değeri (kg/kg)

K = Kütle transfer katsayısı

A = Isı transfer alanı (m^2)

Su moleküllerinin buharlaşmasına dayalı ısı transferi eşitlik 2.8'de hesaplanabilmektedir.

$$dQ_m = h_v \frac{dm_w}{dz} = h_v K(w_{sw} - w) dA \tag{2.8}$$

h_v = Su buharının entalpisi (kJ/kg)

$$dQ_m = h_v \frac{dm_w}{dz} = h_v K(w_{sw} - w) dA \tag{2.9}$$

Su buharının entalpisi eşitlik 2.10 ile hesaplanabilmektedir.

$$h_v = h_{fg_{wo}} + c_{p_v} T_w \tag{2.10}$$

Duyulur ısı transferi eşitliği 2.11'de verilmektedir.

$$dQ_c = h(T_w - T_a)dA \tag{2.11}$$

Bölgesel su damlası sıcaklığındaki doymuş havanın entalpisi eşitlik 2.12 ile hesaplanabilmektedir.

$$h_{masw} = c_{p_a} T_w + w_{sw}\left(h_{fg_{wo}} + c_{p_v} T_w\right) = c_{p_a} T_w + w_{sw} h_v \tag{2.12}$$

Eşitlik 2.12'nin düzenlenmiş ve sadeleştirilmiş hali eşitlik 2.13'de verilmektedir.

$$h_{masw} = c_{p_a} T_w + w h_v + (w_{sw} - w) h_v \tag{2.13}$$

Nemli havanın entalpisi eşitlik 2.14'de verilmektedir.

$$h_{ma} = c_{p_a} T_a + w\left(h_{fg_{wo}} + c_{p_v} T_a\right) \tag{2.14}$$

Eşitlik 2.13'den eşitlik 2.14'u çıkarttığımız zaman elde edilen yeni formül eşitlik 2.15'de verilmektedir.

$$h_{masw} - h_{ma} = \left(c_{p_a} + w c_{pv}\right)(T_w T_a) + (w_{sw} - w) h_v \tag{2.15}$$

Eşitlik 2.15'in basitleştirilmiş hali eşitlik 2.16'da verilmektedir.

$$T_w - T_a = \frac{[(h_{masw} - h_{ma}) - (w_{sw} - w) h_v]}{c_{pma}} \tag{2.16}$$

$$c_{p_{ma}} = c_{p_a} + w c_{p_{v'}}$$

Eşitlik 2.11 yukarıda verilen eşitliklerle tekrar düzenlendiğinde eşitlik 2.17 elde edilir.

$$dQ = K\left[\frac{h}{c_{p_{ma}} K}(h_{masw} - h_{ma}) + \left(1 - \frac{h}{c_{p_{ma}} K}\right) h_v\big((w_{sw} - w)\big)\right]\mathrm{dA} \tag{2.17}$$

Eşitlik 2.17 de kullanılan h/($Cp_{ma}K$) değeri Le_f değerine eşittir. Lewis faktörü de olarak bilinen bu değer evaporatif proseslerdeki kütle ve ısı transferinin bağıl oranıdır.

Bosnjakovic aşağıdaki eşitlikle su – hava karışımlı sistemlerdeki Lewis faktörünü açıklamıştır (Bosnjakovic, 1965). Lewis faktörü eşitliği 2.18'de verilmektedir.

$$Le_f = \frac{0{,}866^{0{,}667}\left(\frac{w_{sw}+0{,}622}{w+0{,}622}-1\right)}{\ln\left(\frac{w_{sw}+0{,}622}{w+0{,}622}\right)} \tag{2.18}$$

Le_f = Lewis faktörü

2.17'daki enerji değişimi hava akışındaki enerji değişimine kesinlikle eşit olmalıdır. Buna bağlı denklem eşitlik 2.19'da gösterilmektedir.

$$\frac{di_{ma}}{dz} = \frac{1}{m_a}\frac{dQ}{dz} = \frac{KdA}{m_a dz}\left[Le_f(h_{masw}-h_{ma}) + \left(1-Le_f\right)h_v(w_{sw}-w)\right] \tag{2.19}$$

Soğutma kulesi modellemelerinde ısı ve kütle transferinin büyük oranda yapıldığı bölge dolgudur. Kısıtlı bir alandaki ısı transfer alanı eşitlik 2.20 formülü ile hesaplanır.

$$dA = a_{fi}A_{fr}dz \tag{2.20}$$

a_{fi} = Belirlenen ıslak alandaki dolgu yoğunluğu (m^2/m^3)

A_{fr} = Ön yüz alanı (m^2)

Eşitlik 2.20'yi eşitlik 2.19'da kullandığımızda oluşan yeni formül eşitlik 2.21'de gösterilmektedir.

$$\frac{di_{ma}}{dz} = \frac{Ka_{fi}A_{fr}}{m_a}\left[Le_f(h_{masw}-h_{ma}) + \left(1-Le_f\right)h_v(w_{sw}-w)\right] \tag{2.21}$$

Merkel yaklaşımında Lewis faktörü 1'e eşit olarak kabul edilmiştir. Lewis faktörü etkisinin çok düşük olduğu ifade edilmiştir. Merkel yaklaşımıyla yenilenen eşitlik 2.21 ve eşitlik 2.5'in sadeleştirilmiş halleri eşitlik 2.22 ve eşitlik 2.23'de verilmektedir.

$$\frac{di_{ma}}{dz} = \frac{Ka_{fi}A_{fr}}{m_a}(h_{masw} - h_{ma}) \tag{2.22}$$

$$\frac{dT_w}{dz} = \frac{m_a}{m_w}\left(\frac{1}{c_{p_w}}\frac{dh_{ma}}{dz}\right) \tag{2.23}$$

Eşitlik 2.22 ve eşitlik 2.23'de havanın dolgudan çıkış değerlerini elde etmek imkansızdır. Havanın sıcaklığının ve neminin de bilinmesi gerekmektedir. Merkel yaklaşımlarıyla kullanılan ampirik formüller sayesinde havanın çıkış değerlerini belirlemek için yapılan yaklaşımlar daha doğru sonuçlar vermektedir. Eşitlik 2.22 ile eşitlik 2.23'ün birleştirilerek kullanılan hali eşitlik 2.24'de belirtilmektedir.

$$\frac{KA}{m_a} = \frac{Ka_{fi}A_{fr}l_{fi}}{m_w} = \frac{Ka_{fi}l_{fi}}{G_w} = \int_{T_{wo}}^{T_{wi}} \frac{c_{pw}dT_w}{(h_{masw} - h_{ma})} \tag{2.24}$$

l_{fi} = Havanın dolgu içinden geçtiği yol (m)

Eşitlik 2.24 genel olarak Merkel yaklaşımının temel ve literatürdeki formülüdür. Eşitlik 2.24 Merkel sayısı olarak da bilinir. Literatürde daha da sıklıkla Merkel formülü eşitlik 2.25'de verilmektedir.

$$Me = \frac{KaV}{L} \tag{2.25}$$

Me = Merkel sayısı

K = Kütle transfer katsayısı

a = Belirlenen ıslak alandaki dolgu yoğunluğu (m^2/m^3)

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

L = Kütlesel su debisi (kg/s)

2.2.3. Ampirik yaklaşım korelasyonları

Merkel yaklaşımı bilinmeyen parametreleri ihmal ederek ve bazı ampirik eşitlikler kullanarak ısı transfer kapasitesinin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Merkel sayısını hesaplamak için kulenin tipine ve dizayn şartlarına bağlı olarak çokça sayıda ampirik korelasyon bulunmaktadır.

Literatürde ve sektörde en sık kullanılan korelasyon eşitlik 2.26'da verilmektedir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan korelasyon da eşitlik 2.26'dır.

$$Me = \frac{KaV}{L} = c\left(\frac{L}{\mathrm{G}}\right)^{n} \tag{2.26}$$

c, n = Performans katsayısı

Lowe ve Christie'ye göre dolgu dizaynında kullanılan ampirik yaklaşım eşitlik 2.27'de verilmektedir (Lowe & Christie, 1961).

$$Me = \frac{KaV}{L} = c_1\left(\frac{L}{\mathrm{G}}\right) + c_2 \tag{2.27}$$

c_1, c_2 = Performans katsayıları

Majumder'e göre dolgu dizaynında kullanılan ampirik yaklaşım eşitlik 2.28'de verilmektedir (Majumdar, 1983).

$$Me = \frac{KaV}{L} = c_1 L^{c_2} G^{c_3} \tag{2.28}$$

c_1, c_2, c_3 = Performans katsayıları

Johnson'a göre dolgu dizaynında kullanılan ampirik yaklaşım eşitlik 2.29'da belirtilmektedir (Johnson, 1989).

$$Me = \frac{KaV}{L} = c_1 L^{c_2} G^{c_3} l_{fi}^{c_4} \tag{2.29}$$

c_1, c_2, c_3, c_4 = Performans katsayıları

2.2.4. Merkel yaklaşımında Chebyshev teoremi uygulamasıyla performans hesaplaması

Dört noktalı Chebyshev teoremi Merkel yaklaşımı integrallerin analizinde kullanılır. Li ve Priddy (Li & Priddy, 1985) çalışmalarında 13 noktalı bir Chebyshev teoremi kullanırken Mills (F., 1995) 7 noktalı analiz metodu kullanmıştır. Chebyshev analizi hava ve su arasındaki entalpi farkını Merkel yaklaşımıyla analiz etmekte kullanılmaktadır (Kloppers J. C., 2003). Merkel yaklaşımından sonuca ulaşmakta çokça farklı metot kullanılmaktadır. Bilgisayar yardımıyla iterasyonlardan sonuç çıkartmak bu metotlardan biridir. British Standard 4485'e göre de kullanılan metot aşağıda gösterilmektedir (British Standard 4485, 1988). Eşitlik 2.30'da dört noktalı Chebyshev teoremi ile Merkel yaklaşımının formülü belirtilmektedir.

$$\int_{T_{wo}}^{T_{wi}} f(x)dx \approx \frac{b-a}{4}[f(x)_1 + f(x)_2 + f(x)_3 + f(x)_4] \tag{2.30}$$

Eşitlik 2.30'un Chebyshev'e göre bir sonraki formül basamağı eşitlik 2.31'de gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} f(x_1) &\approx T_{wo} + 0{,}1(T_{wi} - T_{wo)} \\ f(x_2) &\approx T_{wo} + 0{,}4(T_{wi} - T_{wo)} \\ f(x_3) &\approx T_{wo} + 0{,}6(T_{wi} - T_{wo)} \\ f(x_4) &\approx T_{wo} + 0{,}9(T_{wi} - T_{wo)} \end{aligned} \tag{2.31}$$

Teoreme eşitlik 2.24 yerleştirildiğinde eşitlik 2.32 elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{KaV}{L} &\approx \frac{(T_{wi} - T_{wo)}}{4}\left[\frac{c_{pw1}}{\Delta h_1} + \frac{c_{pw2}}{\Delta h_2} + \frac{c_{pw3}}{\Delta h_3} + \frac{c_{pw4}}{\Delta h_4}\right] \\ &\approx \frac{c_{pwm}(T_{wi} - T_{wo)}}{4}\left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4}\right] \end{aligned} \tag{2.32}$$

Eşitlik 2.32 ile soğutma kulesi dizayn değerlerine göre Merkel sayısı hesaplanır.

2.2.5. Basınç kaybı hesaplamaları

Soğutma kuleleri ısı transferi yaparken taze atmosfer havasına ihtiyaç duyan endüstriyel ekipmanlardır. Isı transferi için gerekli hava soğutma kulesinde belli noktalarda dirence maruz kalmaktadır. Bu direnç de havanın fanlar tarafından atılmasını zorlaştırmaktadır. Daha fazla motor gücü yani elektrik harcanması anlamına gelmektedir. Aşağıdaki formülde soğutma kulelerindeki genel basınç kaybı formülü gösterilmektedir (Kloppers & Kröger, 2003).

$$\Delta p_{fi} = \frac{k_{fi}\rho_a v_a^2}{2} \tag{2.33}$$

k_{fi} = Dolgu basınç kaybı katsayısı

ρ_a = Havanın yoğunluğu (kg/m^3)

v_a = Havanın dolgudaki hızı (m/s)

Eşitlik 2.33'deki değişken olarak kullanılan k_{fi} değeri, farklı geometrik yapılar ve parametreler için hesaplanarak dolgu basınç kaybı bulunur. Görüldüğü üzere hava hızının basınç kaybı üzerindeki etkisi nedeniyle soğutma kulesi dizaynlarında hava hızı mümkün olduğunca düşük seçilmeye çalışılır. Endüstriyel tip saha montajlı soğutma kulelerinde dolgu üzerindeki hava hızı 2 ile 2.5 m/s arasında dizayn edilirken, paket tip yani fabrika montajlı soğutma kulelerinde bu değer 3 ve 3.5 m/s değerlerine kadar çıkmaktadır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Bulgular

3.1.1. Termal performans testleri

Soğutma kulelerinin dolgu performansları üzerinde deneysel analiz yapılırken termal performans ve dolgu malzemelerinde meydana gelen basınç kayıpları üzerinde durulmuştur. Deney tesisatında kullanılan ölçüm cihazlarından alınan değerler, sistem kararlı hale geldikten sonra alınmıştır.

Bir dolgu tipinin eğrisini oluşturmak için pek çok termal şartta test yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada analiz sırasında 20 farklı koşulda su ve hava debisi değiştirilerek test yapılmıştır. Bu testler 4 farklı dolgu yüksekliği için tekrar edilmiştir. Toplamda 80 adet test yapılarak 4 farklı yükseklikteki dolgunun performans katsayıları ve basınç kaybı grafikleri oluşturulmuştur. Her bir yükseklik için (1.500, 1.800, 2.100, 2.400 mm) fan motor frekans aralığı 30, 35, 40, 45 ve 50 Hz.'de değişik hava debileri ve hızlarında testler yapılmıştır. L/G – KaV/L grafiğinin oluşturulması için her farklı dolgu yüksekliği için bu testler tekrar edilmiştir.

Örnek olarak 1.500 mm dolgu yüksekliğindeki test sonuçları farklı parametreler için tablo 3.1'den tablo 3.5'e kadar tablolarda ayrı ayrı verilmektedir.

Tablo 3. 1. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 1

Su Debisi	67 m^3/h
Hava Hızı	2,75 m/s
Ölçülen Basınç Kaybı	200 – 210 Pa
Fan Motoru Frekans Konvertörü Değeri	50 Hz.

Tablo 3. 2. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 2

Su Debisi	67 m3/h
Hava Hızı	1,65 m/s
Ölçülen Basınç Kaybı	30 – 40 Pa
Fan Motoru Frekans Konvertörü Değeri	30 Hz.

Tablo 3. 3. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 3

Su Debisi	52 m^3/h
Hava Hızı	2,25 m/s
Ölçülen Basınç Kaybı	110 – 120 Pa
Fan Motoru Frekans Konvertörü Değeri	40 Hz.

Tablo 3. 4. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 4

Su Debisi	35 m^3/h
Hava Hızı	2,50 m/s
Ölçülen Basınç Kaybı	150 - 160 Pa
Fan Motoru Frekans Konvertörü Değeri	45 Hz.

Tablo 3. 5. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Parametreleri – Örnek 5

Su Debisi	17 m^3/h
Hava Hızı	2,85 m/s
Ölçülen Basınç Kaybı	200 – 210 Pa
Fan Motoru Frekans Konvertörü Değeri	50 Hz.

Yapılan testler sonucunda ise şekil 3.1'den şekil 3.5'e kadar su ve havanın giriş çıkış sıcaklıklarının ölçüm değerleri grafik olarak verilmiştir. Grafiklerdeki kısaltmaların açıklamaları aşağıda verilmektedir.

T_{sg1} = Su giriş sıcaklığı ölçümü yapan 1 nolu transmitter sonucu

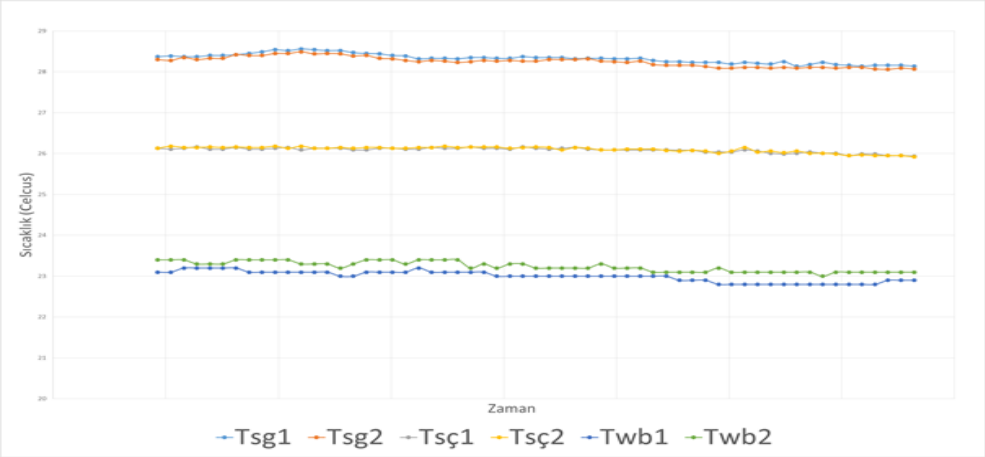
T_{sg2} = Su giriş sıcaklığı ölçümü yapan 2 nolu transmitter sonucu

$T_{sç1}$ = Su çıkış sıcaklığı ölçümü yapan 1 nolu transmitter sonucu

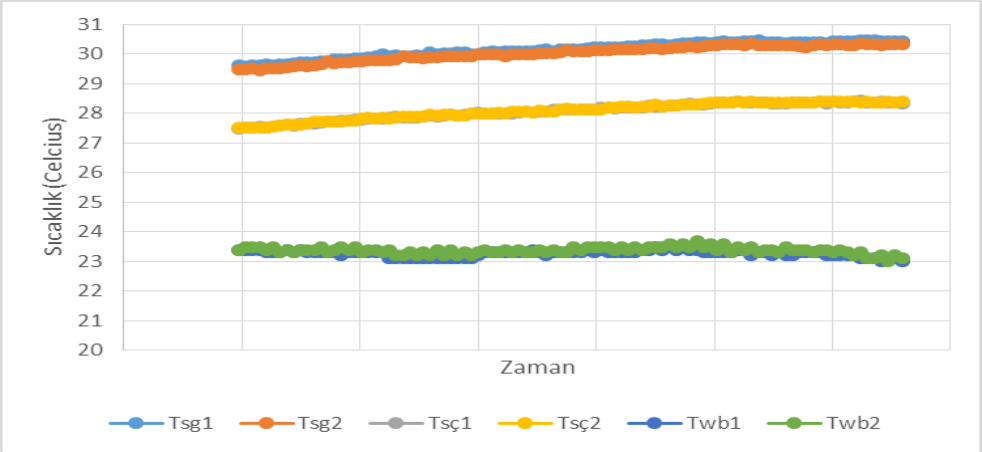
$T_{sç2}$ = Su çıkış sıcaklığı ölçümü yapan 2 nolu transmitter sonucu

T_{wb1} = Yaş termometre sıcaklığı ölçümü yapan 1 nolu transmitter sonucu

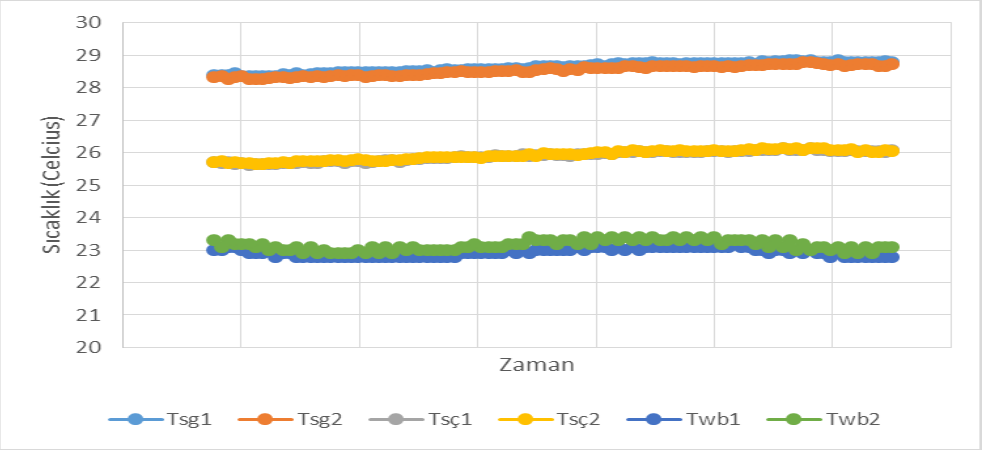
T_{wb2} = Yaş termometre sıcaklığı ölçümü yapan 2 nolu transmitter sonucu



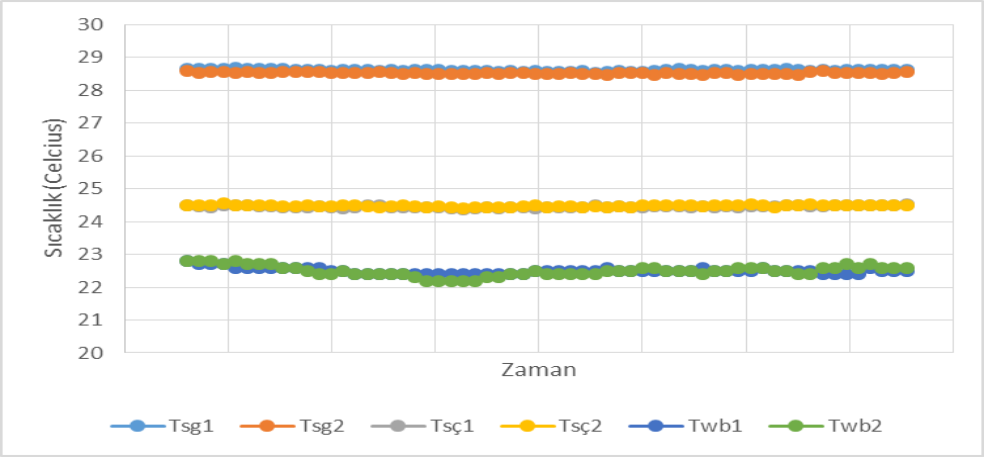
Şekil 3. 1. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 1



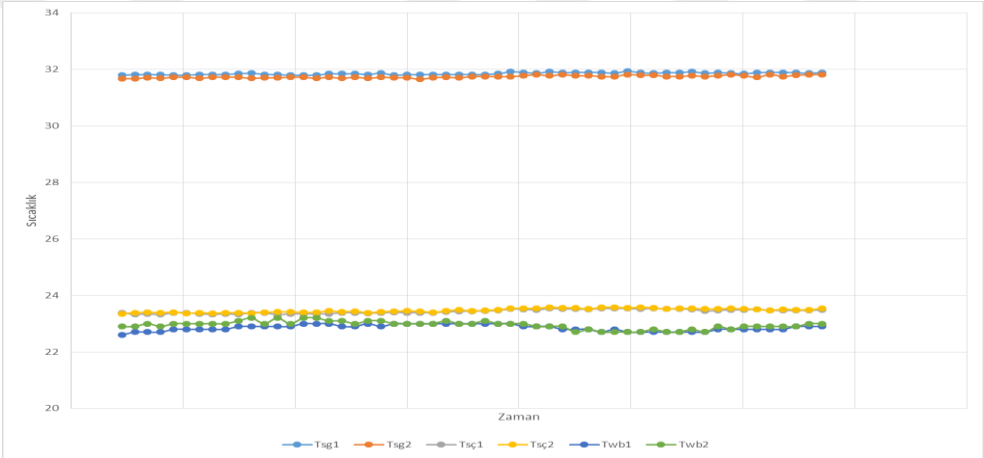
Şekil 3. 2. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 2



Şekil 3. 3. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 3



Şekil 3. 4. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 4



Şekil 3. 5. 1.500 mm Dolgu Yüksekliğindeki Ölçüm Sonuçları – Örnek 5

Ölçüm sonuçları yorumlandığında ortaya çıkan sonuçlar:

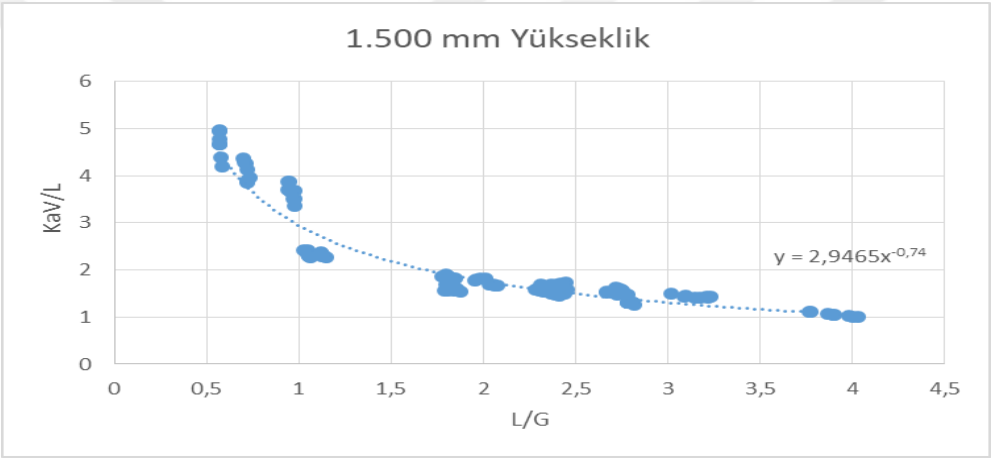
- Yaş termometredeki artışın su çıkış sıcaklığındaki artışa belirli bir zaman sonra etki etmesi,
- Su debisi azaldıkça su giriş ve çıkış sıcaklığı arasındaki farkın artması,
- Hava debisi artıkça su çıkış sıcaklığının düşmesi,
- Özellikle 5 numaralı testte su debisi minimuma indirilmiştir ve hava debisi maksimuma çıkartılmıştır. Bu sayede su çıkış sıcaklığı hemen hemen yaş termometreye eşit alınması sağlanmıştır.

Dolgu test sonuçlarının bir kısmı yukarıda görüldüğü gibidir. Elde edilen değerler kontrol edilip, toleranslara uygun olduğu doğrulandıktan sonra bir sonraki aşamaya yani termal ve teorik analize geçilerek KaV/L değerleri hesaplanmıştır.

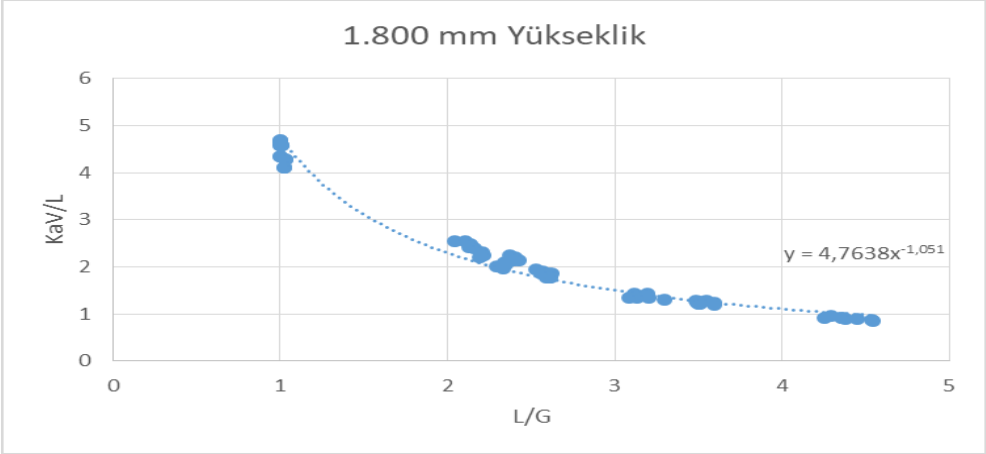
3.1.2. Termal Test Sonuçlarından Merkel'e Göre Dolgu Katsayılarının Oluşturulması

Merkel'e göre dolguların performansını hesaplayıp soğutma kulesi tasarımı yapılabilmesi için dizaynda kullanılacak dolgunun performans katsayılarının bilinmesi gerekmektedir. Çalışmanın bu bölümünde elde edilen test sonuçlarından dolgu katsayıları çıkartılacaktır. Çalışma kapsamında dört farklı yükseklikteki dolgunun katsayıları çıkartılmıştır.

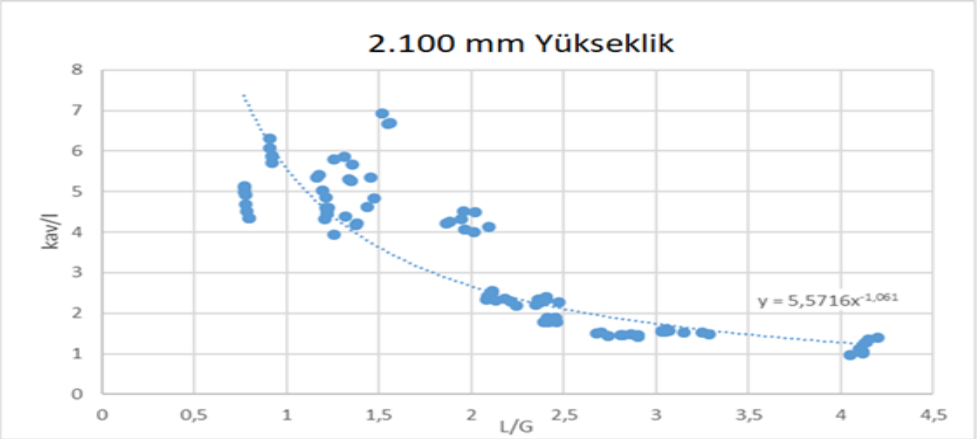
Dolgu katsayıları çıkartılırken eşitlik 2.32 kullanılmıştır. Test sonuçları ile L/G – KaV/L eğrileri oluşturulmuştur. Farklı dolgu yükseklik değerleri için şekil 3.6'dan şekil 3.9'a kadar performans eğrileri verilmiştir.



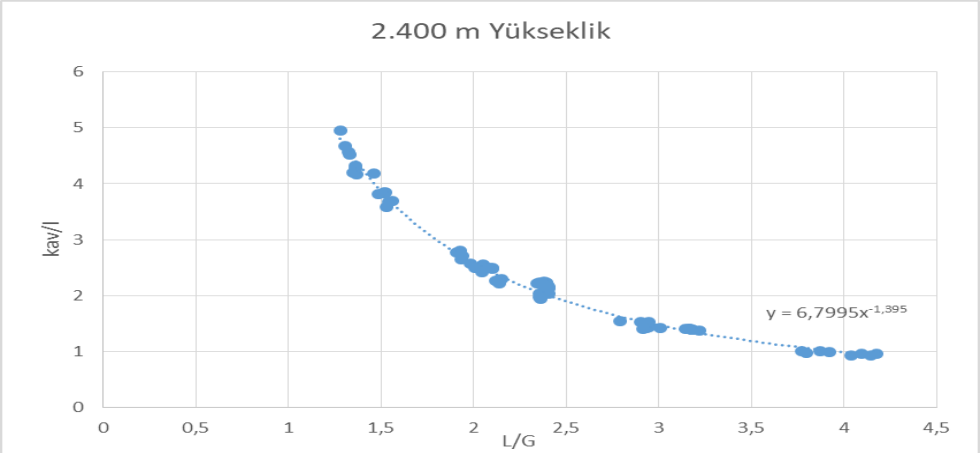
Şekil 3. 6. 1.500 mm Yüksekliğindeki Dolgunun Performans Eğrisi



Şekil 3. 7. 1.800 mm Yüksekliğindeki Dolgunun Performans Eğrisi

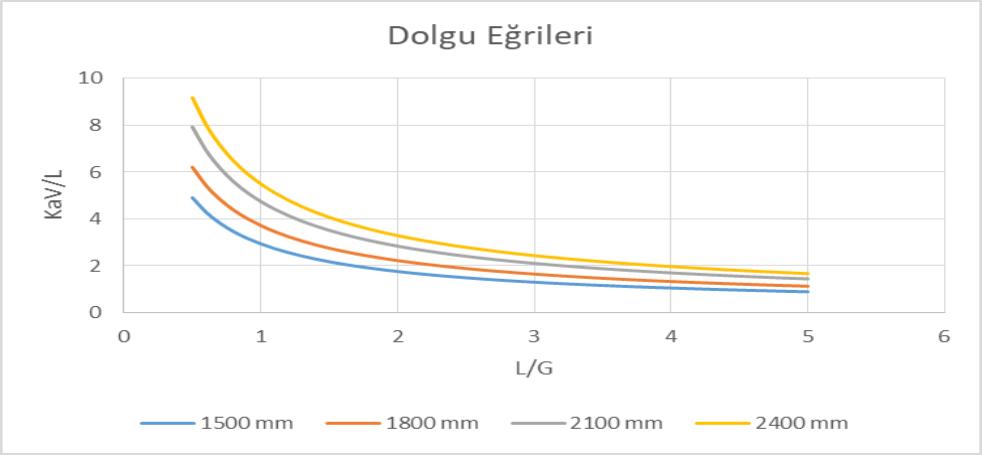


Şekil 3. 8. 2.100 mm Yüksekliğindeki Dolgunun Performans Eğrisi



Şekil 3. 9. 2.400 mm Yüksekliğindeki Dolgunun Performans Eğrisi

Farklı şartlarda alınan ölçüm sonuçlarında katsayılar farklı gelmektedir. Aynı tip dolguların n katsayılarının farklı olması performans eğrilerinin kıvrımlarını etkileyecektir. Eğrilerin birbirine eş kıvrımlara sahip olması için n katsayıları sayısal analiz metotları ile eşitlenmiştir. Tüm dolgu yükseklikleri için düzeltilmiş performans grafikleri şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3. 10. Dolgu Yüksekliklerine Göre Düzeltilmiş Performans Eğrileri

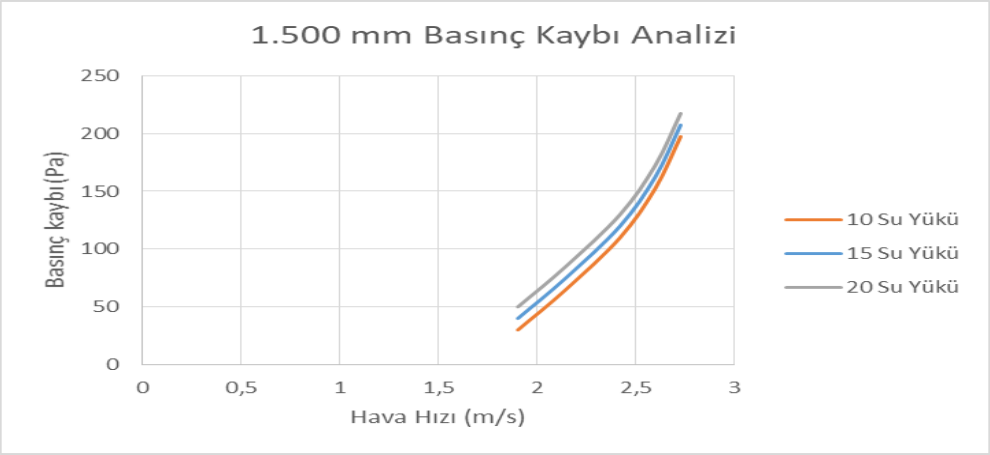
Eşit (n) katsayılarıyla hesaplandığında eğri değişimleri de aynı oranda değişeceği için daha orantılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Şekil 3.10'daki eğrilerin (c) ve (n) katsayıları Tablo 3.6'da gösterilmektedir. Tablo 3.6 veya Şekil 3.10'da görüldüğü gibi dolgu yüksekliği arttıkça (c) katsayılarında artış gözlenmektedir.

Tablo 3. 6. Dolgu Yüksekliklerine Göre Performans c ve n Katsayıları

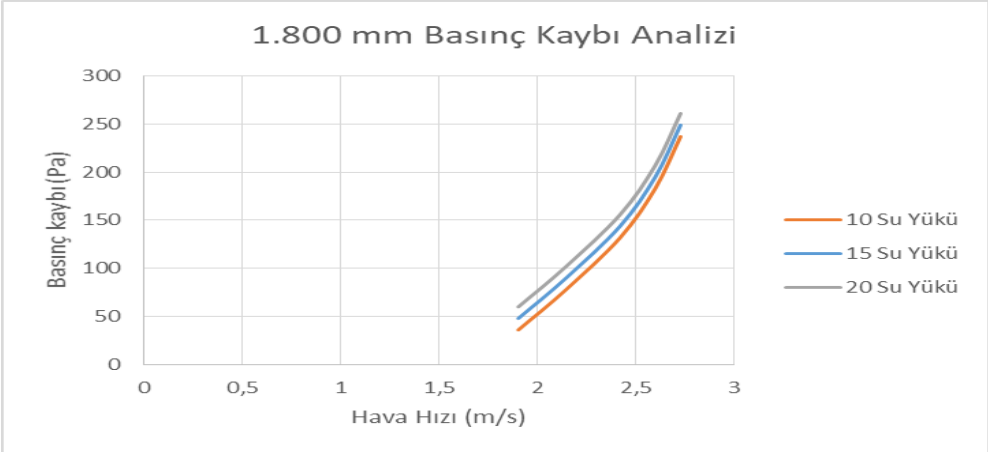
Dolgu Yüksekliği (mm)	(c) katsayısı	(n) katsayısı
1.500	2,95	-0,74
1.800	3,72	-0,74
2.100	4,75	-0,74
2.400	5,50	-0,74

3.1.3. Basınç kaybı test sonuçları ve analizi

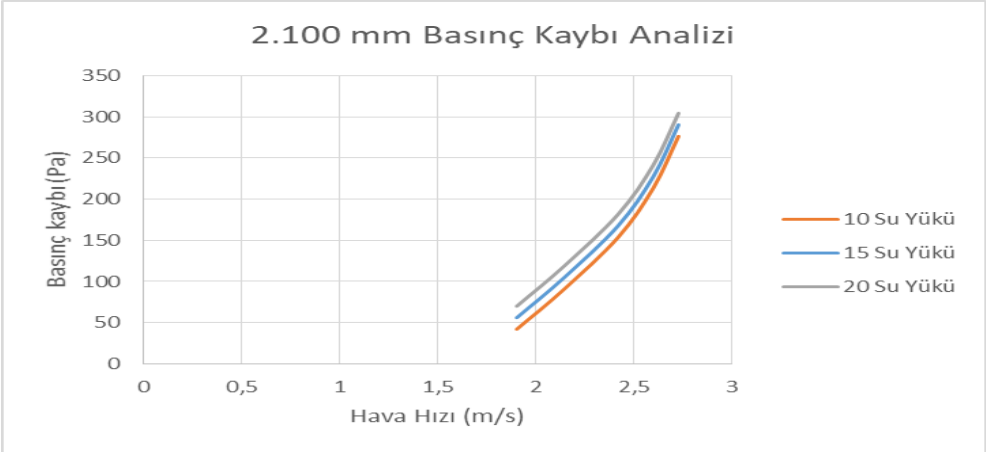
Soğutma kulesi termal değerleri analiz edilirken eş zamanlı olarak basınç kaybı değerleri de okunarak analiz sonuçları desteklenmiştir. Aşağıda Şekil 3.11'den Şekil 3.14'e kadar verilen grafiklerde dolgu yüksekliği değişimlerinin, benzer hava hızlarında ve değişken su yüklerindeki direnç değerleri verilmektedir. Görüldüğü üzere dolgu yüksekliği arttıkça hava tarafındaki direnç de orantılı olarak artmaktadır. Aynı şekilde hava hızı ve su yükünün artması basınç kaybını da artırmaktadır.



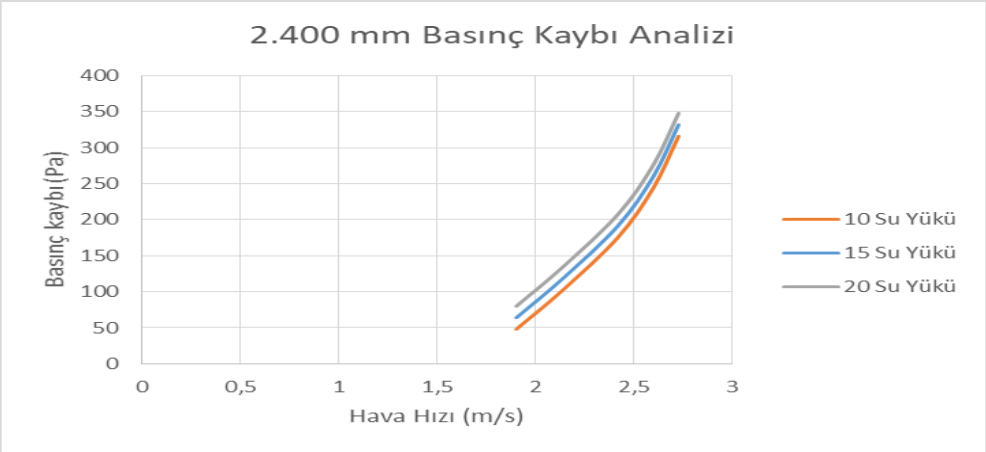
Şekil 3. 11. 1.500 mm'lik dolgunun basınç kaybı değerleri



Şekil 3. 12. 1.800 mm'lik dolgunun basınç kaybı değerleri



Şekil 3. 13. 2.100 mm'lik dolgunun basınç kaybı değerleri



Şekil 3. 14. 2.400 mm'lik dolgunun basınç kaybı değerleri

3.2. Tartışma

Literatürde direkt olarak dolgu yüksekliklerini ve bunun performansa etkisini inceleyen bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bunun yanı sıra matematik modelleme, deneysel inceleme ve teorik incelemelerle algoritma analiz edilmiştir. Farklı tip dolguların gerek performansa gerekse dirence olan etkisi sıkça incelenmiştir.

M. Lemouaria, M. Boumazab ve A. Kaabic yapmış oldukları çalışma sonucunda yüksek su yükü ile çalışan kulenin performansıyla düşük su yükü ile çalışanın performansı kıyaslanmıştır. Yapılan bu çalışmada su yükü arttıkça performans artışı gözlenmiştir (Lemouaria, Boumazab, & Kaabic, 2011). Ancak kendi çalışmamızda ise yüksek su yükünde daha yüksek direnç kayıpları görülmüştür. Performans tarafında da incelendiğinde su yükünün artışı aynı şartlarda L/G değerini düşüreceği için Merkel sayısını da negatif etki gösterecektir. Yüksek su yükünün ısı ve kütle transferi üzerindeki olumlu etkisi sonucu iki çalışmada tezatlık oluşturmaktadır.

Stefanović, Laković, Radojković ve Ilić'in yapmış olduğu deneysel çalışmada da karşı akışlı ve üstten çekişli bir soğutma kulesi kullanılmıştır. Yapılan analiz sonucundaki sıcaklıkların dağılımı saha testlerinden alınanlar ile hemen hemen benzerdir. İlgili çalışmada toplamda 26 adet sıcaklık transmitteri kullanılmıştır (Stefanović, Laković, Radojković, & Ilić, 2000). Arnavutköy / İstanbul'da yapılan bu çalışmada ise toplamda 8 adet sıcaklık transmitteri kullanılmıştır. İlgili çalışmada ara sıcaklıklar da net bir şekilde

izlenebilmiştir. Benzer sonuçlar ise ara değerler olmadan direkt olarak çalışmamızda elde edilmiştir.

Vitkovič, Syrovátka ve Nožička'in yapmış oldukları çalışma sonucundaki basınç kaybı değerleri ele alındığında 500 mm'lik dolgu yüksekliğinde elde edilen değerlerle kendi çalışmamızda çıkan değerler benzerlik gözlenmiştir. İlgili çalışmada 500 mm yükseklikte 2,5 m/s hava hızında 80 Pa'lık basınç kaybı elde edilmektedir. Test edilen dolgu ve soğutma kulesi ve diğer tüm sistem benzerdir. Lakin makale içeriğinde dolguya dair herhangi bir bilgi bulunmamaktadır (Vitkovič, Syrovátka, & Nožička, 2006).

Gharagheizi, Hayati ve Fatemi'nin çalışmasında kullanılan dolgu deney sonuçlarını aldığımız soğutma kulelerimizde kullanılan dolguya benzerlik göstermektedir. Deney sonuçlarını elde ettikleri dolgunun yüksekliği 64 cm'dir. Bu değer ışığında incelemeler yapıldığında L/G'nin 1 olduğu değerde KaV/L değeri 0,2'dir (Gharagheizi, Hayati, & Fatemi, 2007). Yaptığımız çalışmada bu değerler ise 3 ve üzerindedir. Dolgu yüksekliğini performansa oranlasak bile literatürde yapılan bu çalışma ile yaptığımız çalışmadaki dolgu performans katsayılarını uygunluk göstermemektedir. Sonuçta mevcut test sistemimizden çıkan değerler ile literatür çalışması karşılaştırıldığında çıkan sonuçlar daha yüksek olmaktadır.

4. SONUÇ

Yapılan çalışmalar boyunca 19 mm hatveli PVC yapraklı çapraz film tipi dolgu blokları 1500, 1800, 2100 ve 2400 mm yüksekliklerde test edilmiştir. Her bir dolgu yüksekliğinin termal performans katsayılarının çıkartılması için toplamda 20 farklı su ve hava debisi noktasında minimum 1 saatlik ölçüm sonuçları alınmıştır. Alınan test sonuçları sonrasında hesaplama algoritmasına göre analiz edilerek grafiklere dökülmüş, performans katsayıları ve direnç eğrileri oluşturulmuştur.

Şekil 3.10'daki grafik yorumlandığında 4 farklı yükseklikteki dolgunun birbirleri arasındaki performans karşılaştırılması gösterilmektedir. Performansı en düşük olan 1500 mm'lik dolgu olurken en yüksek olanı da 2400 mm'lik yüksekliğe sahip olandır. Her 300 mm'lik dolgu yüksekliği artışında belirli miktarda performans artışı görülmüştür.

Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'deki grafikler yorumlandığında bir önceki paragrafta belirtilen 4 farklı yükseklikteki dolgunun değişken hava hızı ve değişken su yükündeki hava tarafı direnç değerleri gösterilmiştir. Şekillerdeki grafikler değerlendirildiğinde de en düşük direnç değeri 1500 mm'lik dolguda ölçülürken en yüksek değer de 2400 mm'lik dolguda ölçülmüştür.

Soğutma kuleleri dizaynında dolgu yüksekliği ne kadar artırılırsa performans o kadar artmaktadır, lakin bu artışla birlikte hava tarafı direnci de artmaktadır. Direnç direkt olarak ihtiyaç duyulan motor mil gücünü etkileyecek önemli bir faktördür. Yapılacak daha sonraki çalışmalarda performans ve basınç kaybı değerlerine göre optimum değerin elde edilmesidir.

KAYNAKLAR

A.E. Özgür, H. B. (2006). Soğutma Kulesi Dolgu Elemanlarının Oluşturduğu Basınç Kaybının Deneysel İncelenmesi.

Bodur, F. (2016). Yüksek Verimli Elektrik Motoru Tasarımı.

Bosnjakovic, F. (1965). Technical Thermondinamik.

British Standard 4485. (1988). Water Cooling Towers, Part 2: Methods for Performance Testing.

Burkut, E. (1995). Soğutma Sularının Terbiyesi.

Burkut, E. (2010). Soğutma Suyunun Filtrasyonu Gerekliliği ve Filtrasyon Yöntemleri.

Cengiz, A., & Uçar, M. (2006). V Kayışı Mekanizmalarında Sıcaklı ve Nemin Kaymaya Etkisinin Deneysel İncelenmesi. *22*(2).

Cooling Technology Institue. (1998). Cooling Tower Performance Variable. *3*.

Cooling Technology Institute. (2017). Materials of Construction For Cooling Towers.

Cooling Tower Institue. (2011). Mechanical Components for Cooling Tower.

Dreyer, A. A. (1988). Analysis of Evaporative Coolers and Condensers.

Dvořák, L., & Nožička, J. (2014). Counter-Flow Cooling Tower Test Cell.

Eken, M., Ceylan, A., Taştekin, A. T., Şahin, H., & Şensoy, S. (2005). Klimatoloji II.

F., M. A. (1995). Basic HGeat and Mass Transfer.

Gharagheizi, F., Hayati, R., & Fatemi, S. (2007). Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing.

Heidarinejad, G., Karami, M., & Delfani, S. (2009). Numerical simulation of counter-flow wet-cooling towers. *International Journal of Refrigeration* , 996-1002.

Johnson, B. M. (1989). Cooling Tower Performance Prediction and Improvement.

Joseph K. Chan, M. W. (1977). Comparative Evaluation of Cooling Tower Drift Eliminator Performance.

Kelly, N. W. (1976). Kelly's Handbook of Crosslow Cooling Tower Performance.

Khalil, A., Khater, H., & Mostafa, G. (2008). *Cooling Tower Educational Stand.* Kahire: Faculty of Engineering Cairo University.

Kloppers, J. C. (2003). A Critical Evaluation and Refinement of the Performance Prediction of Wet Cooling Towers.

Kloppers, J. C. (2003). A Critical Evaluation and Refinement Of The Performance Prediction of Wet Cooling Towers.

Kloppers, J. C., & Kröger, D. G. (2003). Loss Coefficient Correlation for Wet Cooling Tower Fills.

Kröger, D. G. (2004). *Air Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers Volume 1*. Oklahoma: PennWell Corporation.

Küçükyalı, R. (2001). LEJYONER HASTALIĞINA KARŞI MEKANİK TESİSATTA ALINMASI GEREKEN ÖNLEMLER.

Lemouari, M., Boumaza, M., & Mujtaba, I. (2007). Thermal performances investigation of a wet cooling tower. *Thermal Engineering*, 902-909.

Lemouaria, M., Boumazab, M., & Kaabic, A. (2011). Experimental investigation of the hydraulic characteristics of a counter flow wet cooling tower. *Energy*

Li, K., & Priddy, A. (1985). Power Plant System Design.

Lowe, H. J., & Christie, D. (1961). Heat transfer and pressure drop data on cooling tower packings and model studies of the resistance of natural draft towers to airflow.

Majumdar, A. (1983). 2D Analiysis of flow, heat and mass transfer in evaporative cooling towers.

Pan, T.-H., Shieh, S.-S., Jang, S.-S., Tseng, W.-H., Wu, C.-W., & Ou, J.-J. (2011). Statistical multi-model approach for performance assessment of cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 1377-1385.

Ramakrishnan, R., & Arumugam, R. (2014). Experimental Study and Performance Analysis of Ceramic Packing Cooling Tower Using Taguchi Method. *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, 45-53.

Sadıkoğlu, İ. H. (1996). Ters Akımlı Soğutma Kulelerinde Isı ve Kütle Geçişi.

SPX Cooling Technologies. (2009). *Cooling Tower Fundamentals.* Kansas: SPX Cooling Technologies.

Stefanović, V., Laković, S., Radojković, N., & Ilić, G. (2000). Experimental Stuy on Heat and Mass Transfer in Cooling Towers. *Mechanical Engineering*, 849-861.

Türk Tesisat Mühendisleri Derneği. (2007). Psikrometri Nedir? *27*.

Uzunlar, M. (1998). Su soğutma kuleleri için temel bilgiler.

VDI. (2010). Cooling Towers. *Second Edition*.

Vitkovič, P., Syrovátka, V., & Nožička, J. (2006). Cooling Tower Experiment.

ÖZGEÇMİŞ

Görkem ZENGİN 22 Kasım 1993'de İstanbul Beyoğlu'nda doğmuştur. Beykoz Anadolu Lisesi'nin Fen Bilimleri Bölümü'nü 2011 yılında bitirmiştir. 2015 yılında Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. 2014 ile 2015 yılları arasında İklimsoft İklimlendirme ve Soğutma Endüstrisi Yazılımları Limited Şirketi'nde termal ürünlerin hesaplamasından Sorumlu Araştırma ve Geliştirme Bölümünde çalışmıştır. 2016 yılında işe başladığı Cenk Endüstri Tesisleri İmalat ve Taahhüt A.Ş. firmasında 2018 Kasım ayı itibariyle Proje Yöneticisi ve Mühendislik Şefi görevinde çalışmaktadır.