

# MAKALE

## KAPALI ÇEVİRİM BİR SOĞUTMA KULESİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

*Theoretical And Experimental Analysis Of A Closed Circuit Cooling Tower*

**Oğuz DALKIRAN, Aytunç EREK**

### HAKEMLER\*

A. İbrahim ATILGAN, Yrd. Doç. Dr.  
Abdülvahap YİĞİT, Prof. Dr.  
Ahmet CAN, Prof. Dr.  
Ali GÜNGÖR, Prof. Dr.  
Arif HEPBAŞLI, Prof. Dr.  
Aytunç EREK, Prof. Dr.  
Bedri YÜKSEL, Prof. Dr.  
Dilek KUMLUTAŞ, Prof. Dr.  
Fikret PAZIR, Prof. Dr.  
Hüsamettin BULUT, Prof. Dr.  
İlhan Tekin ÖZTÜRK, Prof. Dr.  
İsmail KARAÇALI, Prof. Dr.  
M. Barış ÖZERDEM, Prof. Dr.  
M. Turhan ÇOBAN, Doç. Dr.  
Macit TOKSOY, Prof. Dr.

Mehmet KANOĞLU, Prof. Dr.  
Moghtada MOBEDİ, Doç. Dr.  
Muhsin KILIÇ, Prof. Dr.  
Mustafa ACAR, Prof. Dr.  
Olca KINCAY, Prof. Dr.  
Orhan BÜYÜKALACA, Prof. Dr.  
Ramazan KÖSE, Prof. Dr.  
Rasim KARABACAK, Prof. Dr.  
Recep YAMANKARADENİZ, Prof. Dr.  
Selami KESLER, Yrd. Doç. Dr.  
Serhan KÜÇÜKA, Prof. Dr.  
Y. Onur DEVRES, Prof. Dr.  
Tunca YILMAZ, Prof. Dr.  
Yunus ÇERÇİ, Prof. Dr.

\*Alfabetik olarak sıralanmıştır. Makale/Makaleler, kurulda yer alan ve değerlendirme yapmak üzere seçilen hakemler tarafından incelenmiştir.

# KAPALI ÇEVİRİM BİR SOĞUTMA KULESİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

## *Theoretical And Experimental Analysis Of A Closed Circuit Cooling Tower*

**Oğuz DALKIRAN, Aytunç EREK**

### 1. ÖZET

Bu çalışmada, kapalı çevrim bir su soğutma kulesi, sayısal ve deneysel olarak incelenmiş olup, sayısal çalışmalarda Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılarak soğutma kulesi termodinamik modellemesi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar, modüler olarak imal edilmiş bir soğutma kulesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, ısı değiştiricinin bağlantı şekli, sprey suyu debisi ve yaş termometre sıcaklığının etkisi ele alınarak farklı çalışma şartlarında testler gerçekleştirilmiştir. Prototip test kulesinde, ısı değiştirici iki parça halinde üretilmiş olup ısı değiştiricilerin çapraz bağlanması durumunda çok yollu bir sistemin ısı transferi katsayısına ve soğutma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Ayrıca sprey suyu debisindeki değişime bağlı olarak COP değeri ve ısı transferi katsayısı incelenmiştir. Cihaz testleri, atmosfere açık ortamda, farklı yaş termometre sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda sprey suyu debisindeki artışın ve çok yollu ısı değiştirici uygulamasının, ısı transfer katsayısı değerinde artış sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Yaş termometre sıcaklığının yüksek değerlerinde çalışılan koşullarda ise kule kapasitesinin olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Kapalı çevrim su soğutma kulesi, Isı transfer katsayısı, EES, deneysel çalışma, yaş termometre*

### ABSTRACT

In this study, a closed circuit water cooling tower was examined numerically and experimentally. In numerical studies, thermodynamic modeling was performed by using Engineering Equation Solver (EES) software. Experimental studies were performed on a modularly manufactured cooling tower. In experimental studies, the effect of heat exchanger

connection method, spray water flow rate and wet bulb temperature were examined and tests were carried out under different operating conditions. In the prototype test tower, the heat exchanger was produced in two parts and the effect of a multipath system on heat transfer coefficient and cooling capacity in case of cross linking of heat exchangers was investigated. In addition, the COP value and heat transfer coefficient were investigated according to the change in the spray water flow. Device tests were carried out at different wet bulb temperatures in the open atmosphere. As a result of experimental studies, it has been concluded that the increase in spray water flow and multipath heat exchanger application increase the heat transfer coefficient value. It has been observed that the tower capacity is adversely affected at the high wet bulb temperature.

*Keywords: Closed circuit water cooling tower, heat transfer coefficient, EES, experimental study, wet bulb temperature*

### 1. GİRİŞ

Üretim hatları, kimyasal prosesler, motorlar, güç üretim tesisleri, nükleer santraller gibi sayısız alanda ısı açığa çıkmaktadır. Isının, bu tip uygulamalarda kontrol edilmesi ve soğutucu cihazlar vasıtası ile uzaklaştırılması gerekmektedir. Su soğutmalı sistemlerde kendine geniş bir kullanım alanı bulan soğutma kuleleri, bu uygulamalarda ısının uzaklaştırılmasında verimli çözümler sunar. Yüksek debilerde su soğutabilme imkânı ve yüksek soğutma kapasitelerine çıkabilmesi, atmosfer şartlarından faydalanarak ısı ve kütle transferi mekanizmalarını birleştirmesi ile birim işletme maliyetlerinin düşük olması, soğutma kulelerinin tercih edilebilirliğini günden güne arttırmaktadır. [1] Buharlaştırma soğutma prensibi ile çalışan

kapalı çevrim su soğutma kuleleri, kuru çalışan ısı değiştiricilere oranla çok daha yüksek ısı transferi katsayılarına sahip olması sayesinde, ısıyı uzaklaştırabilme kabiliyeti bakımından üstündür. Isı değiştiricisi üzerinde spreylene su ve ona karşıt olarak akan hava sayesinde gizli ve duylur ısı transferinin aynı anda gerçekleştiği ve soğutmanın sağlandığı cihazlardır. Su soğutma kulesi uygulamalarında atmosfer, ısı kuyusu olarak kullanılmaktadır. Ortaya çıkan ısı, sistemin devamlılığını sağlamak veya konfor şartlarını oluşturmak amacı ile atmosfere atılmaktadır. Bu duruma ek olarak su buharı da atmosfere atılan ve göz ardı edilmemesi gereken bir olgudur. [1] Sürekli artan soğutma talebi ve enerji maliyetleri de ele alındığında daha verimli sistemlerin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu açıdan soğutma kulelerinin optimizasyonu ve farklı parametrelere bağlı olarak kapasite değerlerinin net olarak hesaplanabilmesi, enerji verimliliği konusunda çok önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmada karşıt akışlı kapalı çevrim bir su soğutma kulesinin performansını doğru ve uygun bir şekilde tahmin etmek ve diğer termodinamik özelliklerinin hesaplanabilmesi için Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılmıştır ve mevcut çalışmalardaki korelasyonlar ile sayısal olarak bir boyutlu modellenmiştir. Oluşturulan test düzeneğinde, prototip olarak üretilen kapalı çevrim soğutma kulesi termal testleri yapılmıştır. Farklı parametrelerin kule kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Isı değiştiricisinin çapraz bağlanması ile toplam ısı transferi katsayısında artış elde edilmiş ve bu durum kule kapasitesini artırmıştır. Yapılan testler sonucu elde edilen değerler ile hesaplanan değerler karşılaştırılarak hesap edilen değerler ile deneysel olarak ölçülen değerler arasında %5'ten daha az sapma olduğu görülmüştür.

### 1.1. Literatür Araştırması

Literatürde kapalı çevrim su soğutma kuleleri ile ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır. Farklı ısı değiştiricisi tasarımları ile farklı hava ve su debilerinde elde edilen ısı ve kütle denklemleri sonucunda termodinamik yasaları kapsamında daha doğru ve kesin tahminler yapılabilmektedir. Parker ve Treybal [2] karşıt akışlı soğutma kulelerinin detaylı analizlerini gerçekleştiren ilk araştırmacılarıdır. Doymuş havanın entalpisinin sıcaklığın lineer bir fonksiyonu olduğu kabulü yapılmıştır. Bağlılıklarını ve testlerini 19 mm dış çaplı düz borular ve kaydırılmış tip boru demetinde

gerçekleştirmişlerdir. Deneysel testlere bağlı olarak, sıcaklık ve nem dağılımını hesaplamada rol alan, ısı transferi ve kütle transferi katsayıları elde edilmiştir.

Mizushina ve Ark. [3] Parker ve Treybal'ın yaklaşımına benzer bir yaklaşım kullanmış ve denklemlerini bilgisayar vasıtası ile nümerik olarak integre etmiştir. Çalışmalarında, karşıt akışlı kule içerisindeki sprej suyu sıcaklığı değişimini ortalama ve sabit bir değerde olduğu yaklaşımında bulundular. Teorik çalışmalarına ek olarak yaptığı deneyler ile düz yüzeyli 12,7-19-40 mm dış çaplı, kaydırılmış tip boru demetinde ısı ve kütle transfer katsayılarını elde etmiştir. Hesaplarında buharlaşan sprej suyu miktarını ihmal etmişler ve Lewis Faktörünü 1 olarak almışlardır.

Nitsu ve ark. [4] çalışmalarında kaydırılmış tip boru demetinde, düz boru ve kanatçıklı boru kullanmışlardır. Isı ve kütle transfer katsayılarını veren korelasyonları ve geçerli oldukları aralıkları belirlemişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırmışlardır.

Dreyer ve Erens [5] kaydırılmış tip boru demetinde çapraz akışlı düzlemde düz boru üzerinde deneysel çalışmalar yapmış ve ısı ve kütle transfer katsayılarını karşıt akış düzenlemesi ile karşılaştırmışlardır.

Leidenfrost ve Korenic [6] ilk çalışmalarında karşıt akışlı buharlaşmalı kondenser analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sayısal modelde Lewis Faktörünü 1 olarak kabul etmiştir. Kütle transfer katsayısını kütle ve ısı transferi arasındaki benzerlikten hesaplamış ve diğer tüm gerekli katsayıları ayrıntılı olarak elde etmiştir. 15,9 mm düzgün sıralı boru demetinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Hasan ve Sirén [7] çalışmalarında kanatçıklı, düz ve elips boru demeti bulunan buharlaşmalı ısı değiştiricileri, kapalı çevrim soğutma kulelerini ve kuru soğutucuları incelemişlerdir. Çalışmalarında teorik analiz, CFD analizleri ve deneysel ölçümleri kullanmışlardır. CFD çalışmalarında binalarda soğutulmuş tavan uygulaması için kullanılan kapalı çevrim soğutma kulesini modellemişlerdir. Prototip olarak imal edilmiş kulede deneysel verileri elde ederek optimum kule geometrisi ve debileri belirleyerek kulenin COP değerini elde etmişlerdir.

Oliveira ve Facao [8] yeni tasarladıkları kapalı çevrim bir soğutma kulesinin soğutulmuş tavan uygulaması olan bir binada kullanım etkisini incelemişlerdir. 10 mm dış çaplı borulardan oluşan ısı değiştiricisi ile sürdürdükleri testlerde dizayn şartları 21°C su giriş sıcaklığı ve 0,8 kg/s su debisi ile

çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Çalışmalar sonucunda sprey debisi ve hava debisini artırdıklarında kule veriminde artış yakalayabilirlerken, soğutulacak su debisi arttığında verim azalmıştır.

Sarker ve Ark. [9] Çalışmalarında kapalı çevrim bir su soğutma kulesinde çok yollu ısı değiştiricisi tasarımını deneysel olarak incelemişlerdir. 19 mm dış çaplı borulu ısı değiştiricide yaptıkları çalışmalarda çok yollu tasarımın tek yollu tasarıma göre daha iyi ısı ve kütle transfer katsayılarına sahip olduğu belirlenmiştir.

Dreyer ve Erens [5] kaydırılmış tip boru demetinde çapraz akışlı düzlemde düz boru üzerinde deneysel çalışmalar yapmış ve ısı ve kütle transfer katsayılarını karşı karşıya düzenlemesi ile karşılaştırmışlardır.

Leidenfrost ve Korenic: [6] ilk çalışmalarında karşıt akışlı buharlaşmalı kondenser analizlerini gerçekleştirmiştir. Sayısal modelde Lewis Faktörünü 1 olarak kabul etmiştir. Kütle transfer katsayısını kütle ve ısı transferi arasındaki benzerlikten hesaplamış ve diğer tüm gerekli katsayıları ayrıntılı olarak elde etmiştir. 15,9 mm düzgün sıralı boru demetinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Hasan ve Sirén: [7] çalışmalarında kanatçıklı, düz ve elips boru demeti bulunan buharlaşmalı ısı değiştiricileri, kapalı çevrim soğutma kulelerini ve kuru soğutucuları incelemişlerdir. Çalışmalarında teorik analiz, CFD analizleri ve deneysel ölçümleri kullanmışlardır. CFD çalışmalarında binalarda soğutulmuş tavan uygulaması için kullanılan kapalı çevrim soğutma kulesini modellemişlerdir. Prototip olarak imal edilmiş kulede deneysel verileri elde ederek optimum kule geometrisi ve debileri belirleyerek kulenin COP değerini elde etmişlerdir.

Oliveira ve Facao [8] yeni tasarladıkları kapalı çevrim bir soğutma kulesinin soğutulmuş tavan uygulaması olan bir binada kullanım etkisini incelemişlerdir. 10 mm dış çaplı borulardan oluşan ısı değiştiricisi ile sürdürdükleri testlerde dizayn şartları 21°C su giriş sıcaklığı ve 0,8 kg/s su debisi ile çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Çalışmalar sonucunda sprey debisi ve hava debisini artırdıklarında kule veriminde artış yakalayabilirlerken, soğutulacak su debisi arttığında verim azalmıştır.

Sarker ve Ark. [9] Çalışmalarında kapalı çevrim bir su soğutma kulesinde çok yollu ısı değiştiricisi tasarımını deneysel olarak incelemişlerdir. 19 mm dış çaplı borulu ısı değiştiricide yaptıkları çalışmalarda çok yollu tasarımın tek yollu tasarıma göre daha iyi ısı ve kütle

transfer katsayılarına sahip olduğu belirlenmiştir.

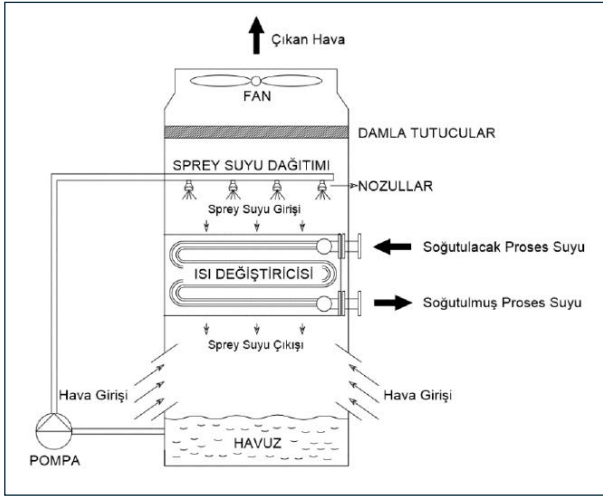
## 2. SU SOĞUTMA KULESİ TASARIM PARAMETRELERİ

Su soğutma kuleleri ısı ve kütle transferinin birlikte gerçekleştiği atmosferik şartlara bağlı olarak çalışan soğutma cihazlarıdır. Bir soğutma kulesinin kapasitesi hesaplanırken, soğutulacak su debisi, suyun özgül hacmi ve ısı değiştiricisine giriş-çıkış suyu sıcaklıkları bilinmesi gerekmektedir. Kapasite hesabı denklem (1)'de verilmiştir; [14]

$$Q = m_p \times c_{pp} \times (T_{po} - T_{pi}) \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

Bu denklemde bilinmeyen ve bulunması gereken parametre, soğutulacak suyun, ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı olmaktadır. Çıkış suyu sıcaklığı  $T_{po}$  sistemin sürekli rejime gelmesi durumuna kadar pek çok parametreye bağlıdır. Hava debisi, sprey suyu debisi, proses suyu debisi, yaş termometre sıcaklığı ve ısı değiştirici geometrisi hesaba katılarak çıkış suyu sıcaklığı tahmin edilmektedir. Hesaba katılan değerlerde herhangi bir yanlışlık, çıkış suyu sıcaklığının yanlış hesaplanmasına neden olarak yanlış kapasitelerin elde edilmesi sonucunu ortaya çıkaracaktır. Soğutma kulelerinin kullanılacakları proseslere uygun olarak tasarlanması bu bağlamda önemli bir yer tutar. Endüstriyel uygulamalarda yanlış hesaplanmış kapasite, soğutulması gereken makine ve teçhizatın çalışmasını olumsuz yönde etkileyecek veya hasara sebep olabilecektir.

Şekil 1'de kapalı çevrim bir su soğutma kulesinin şematik görünümü verilmiştir. Kule, temel olarak, havuz kısmı, ısı değiştirici bölümü, su dağıtım sistemi ve fan bölümü olmak üzere 4 bölümden oluşmaktadır. Havuz kısmında ısı değiştirici üzerine spreylene sirkülasyon suyu bulunmaktadır. Buradaki su, bir pompa vasıtasıyla hareketlendirilmekte ve dağıtım sistemine yollandığı görülmektedir. Dağıtım sisteminde bulunan nozullar vasıtasıyla su, ısı değiştiricisi üzerine, ıslatılmamış ölü bölge kalmayacak şekilde dağıtılmaktadır. Isı değiştiricisinde ise soğutulacak proses suyu dolaşmaktadır. Kulenin üst kısmında bulunan bir fan ise kulenin alt kısmında bulunan emiş panjurlarından dış ortam havasını çekerek sprey suyu ile karşıt akış oluşturur ve ısı değiştirici içerisinde dolaşan proses suyunun soğutulmasını sağlar.



Şekil 1. Kapalı çevrim bir su soğutma kulesinin şematik görünümü.

### 3. KAPALI ÇEVİRİM SU SOĞUTMA KULESİ MATEMATİKSEL HESAPLAMALARI

Kapalı çevrim bir su soğutma kulesinden elde edeceğimiz soğutma kapasitesini ve ısı değiştiricisinden suyun çıkış sıcaklığını bulmak için, yaş termometre değeri ve kulenin tasarimsal parametreleri bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler bilindikten sonra, ısı ve kütle transferi mekanizmalarının işleyişindeki denklem bütünlüğünü oluşturabilmek amacı ile korunum denklemleri çıkarılmalı ve kabuller ile birlikte çözümlenmelidir.

#### 3.1. Kabuller

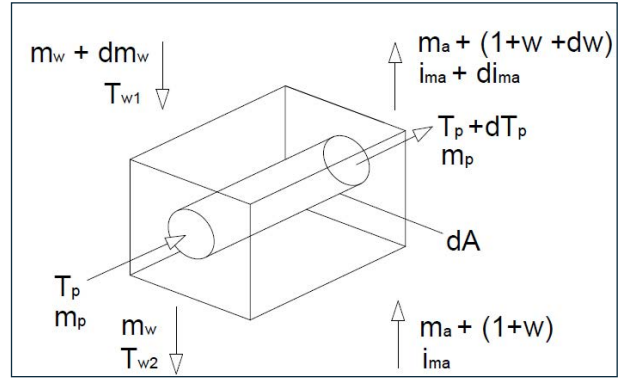
Soğutma kulesinin hesaplarında ve korunum denklemlerinin elde edilmesinde bazı kabuller yapılmıştır bunlar;

- Sistem tam rejime ulaşmıştır
- Radyasyonla oluşan ısı transferi ihmal edilmiştir
- Spreysel suyu, boru demetini tam olarak ıslatmaktadır
- Isı değiştirici üzerinde akan su filmi sıcaklığı sabittir
- Spreysel suya pompa nedeniyle oluşan sıcaklık artışı ihmal edilecektir
- Hava-su temas alanı tüp demetinin dış yüzeyi ile yaklaşık aynıdır, diğer bir deyişle tüpler üzerindeki su filmi incedir
- Lewis Faktörü 1 olarak alınmıştır

olmaktadır. Bu kabuller sonucu kütle ve enerji korunum denklemleri çözümlenmektedir. [1]

#### 3.2. Enerji Dengesi

Boru demeti içerisinde dolaşan soğutulacak olan proses suyundan spreysel suya, sıcaklık farkından dolayı ısı transferi olmaktadır. Şekil 2'de buharlaşmalı soğutmanın gerçekleştiği kontrol hacminde hava spreysel suyu ve proses suyu dengesi gösterilmiştir. [1]



Şekil 2. Buharlaşmalı soğutma kontrol hacmi.

Kontrol hacmindeki ısı transferi aşağıdaki denklemle açıklanabilir;

$$dQ_p = m_p \times c_{pp} \times dT_p = U_0 \times \Delta T_{LM} \times dA \quad (W) \quad (2)$$

$U_0$  burada toplam ısı transferi katsayısı olmaktadır.

$$U_0 = \left[ \frac{1}{\frac{1}{h_w} + \frac{d_o \times \ln \frac{d_o}{d_i}}{2 \times k_s} + \frac{d_o}{d_i} \times \frac{1}{h_p}} \right]^{-1} \quad (W/m^2K) \quad (3)$$

Burada  $h_w$  spreysel suyu ile boru dış yüzeyi arası ısı transfer katsayısıdır ve deneysel yöntemler ile bulunan korelasyondan elde edilmektedir.  $k_s$  boru malzemesine bağlı iletim katsayısı ve  $h_p$  boru içerisinde akan akışkan ile boru arası ısı transfer katsayısıdır.  $d_o$  ve  $d_i$  sırası ile boru dış ve iç çapı olmaktadır. [7]

#### 3.3. Spreysel Suyu - Hava Ara Yüzündeki Isı Transferi

Spreysel suyu ısı değiştirici üzerinden akarken, karşıt olarak akan hava ile ara yüzde ısı ve kütle transferi gerçekleşir. Spreysel suyu ve hava ara yüzündeki toplam enerji transferi, buhar konsantrasyonundaki farktan ve ısı farkından dolayı ısı transferine bağlı olarak kütle transferi ile ilişkili bir entalpi transferinden oluşur. [7]

Toplam ısı transferi;

$$dQ = dQ_m + dQ_c \quad (W) \quad (4)$$

$dQ_m$  gizli ısı ve  $dQ_c$  duyulur ısı transferi toplamını kapsamaktadır.

Gizli ısı transferi;

$$dQ_m = (i_{fgwo} + c_{pv} \times T_p) \times h_d \times (w_{sw} - w) dA_a \quad (W) \quad (5)$$

Duyulur ısı transferi;

$$dQ_c = h(T_w - T_a) dA_a \quad (W) \quad (6)$$

Denklemler yerine konularak gerekli sadeleştirmeler yapıldığında toplam ısı transferi;

$$dQ = h_d \times \left( \left( \frac{h}{c_{pma} \times h_d} \right) \times (i_{masw} - i_{ma}) + \left( 1 - \frac{h}{c_{pma} \times h_d} \right) \times (i_{fgwo} + c_{pv} \times T_w) \times (w_{sw} - w) \right) \times dA_a \quad (W) \quad (7)$$

Olarak bulunmaktadır. Buradaki  $\left( \frac{h}{c_{pma} \times h_d} \right)$  ifadesi Lewis Faktörü olarak adlandırılır. Buharlaşmalı soğutmada ısı transferinin kütle transferine oranı olarak tanımlanmaktadır. Lewis Faktörü'nün değeri 1 olarak kabul edildiğinde;

$$dQ = h_d \times (i_{masw} - i_{ma}) \times dA_a \quad (W) \quad (8)$$

Sprey suyu – hava ara yüzünde gerçekleşen ısı transferi ile spray suyunun ısıyı havaya aktarılmaktadır;

$$dQ_a = dQ \quad (W) \quad (9)$$

$$dQ_a = m_a di_{ma} \quad (W) \quad (10)$$

$$di_{ma} = h_d \times (i_{masw} - i_{ma}) \times dA_a / m_a \quad (W) \quad (11)$$

olmaktadır. Havanın entalpi değişimi bu denklem ile çözdürülebilmektedir.

### 3.4. Toplam Enerji Dengesi

Soğutma kulesinin toplam enerji dengesi şu şekilde yazılmaktadır; [7]

$$dQ_p + dQ_a + dQ_s = 0 \quad (W) \quad (12)$$

Burada  $dQ_s$ , spray suyunun ısı transferi olmaktadır.

$$dQ_s = m_{wm} \times c_{wm} \times (T_{w1} - T_{w2}) \quad (W) \quad (13)$$

Sprey suyu sıcaklığı dağılımının tüm kule içerisinde sabit olduğu ve ısı kayıplarının ihmal edildiği kabulü ile buradaki  $dQ_s$  terimi yok olmaktadır. Diğer bir ifade ile ısı değiştiricisinin üzerinden akan spray suyunun her noktada eşit sıcaklıkta olduğu kabulü yapılmaktadır

$$T_{w1} = T_{w2} \quad (14)$$

Isı değiştiricinin üst sıralarında, proses suyunun yüksek sıcaklığı ve entalpisi yükselmiş hava sebebi ile sprej suyu sıcaklığı artar. Spreylenen su, ısı değiştiricinin alt sıralarına ilerlerken, entalpisi ve sıcaklığı düşük hava ile karşılaşarak ısısını havaya aktarmaktadır.

Son durumda, proses suyunun enerji transferi havaya olan enerji transferine eşit olmaktadır.

$$dQ_p + dQ_a = 0 \quad (W) \quad (15)$$

### 3.5. Kütle Dengesi

Kapalı çevrim soğutma kulelerinde, havaya kütle transferi olmaktadır. Sprej suyu – hava ara yüzeyinden sprej suyu buharlaşmaktadır. Buharlaşan su miktarı; [1]

$$m_e = m_a \times (w_o - w_i) \quad (kg/s) \quad (16)$$

Hava debisi ile kuleye giren ve çıkan havanın nem miktarı farkı çarpımından elde edilir. Buharlaşan su miktarı kadar soğutma kulesinin havuzuna su beslemesi yapılmalıdır.

## 4. EES YAZILIMI İLE KAPALI ÇEVİRİM SOĞUTMA KULESİNİN TERMODİNAMİK MODELLEMESİ

### 4.1. Girdiler

EES programında ilk olarak sıcaklıklar ve debiler tanımlanmıştır. Kuleye giriş sıcaklığı, tahmini çıkış suyu sıcaklığı, havanın nem ve sıcaklık değerine bağlı olarak elde edilen yaş termometre sıcaklığı, fan tarafından yaratılan hava debisi, sprej suyu debisi, proses suyu debisi, hava basıncı ve yoğunluğu tanımlanan değerler olarak aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1. Akışkan debileri ve diğer termodinamik özellikler

SİMGE	DEğER	BİRİM	TANIM
$T_{pi}$	35	°C	"Kuleye giriş sıcaklığı"
$T_{po}$	30	°C	"Tahmini kuleden çıkış sıcaklığı"
$T_{wb}$	24	°C	"Yaş termometre sıcaklığı"
$T_{ai}$	30	°C	"Dış hava sıcaklığı"
$rh_{ai}$	62	%	"Dış hava bağlı nem değeri"
$m_{avi}$	6,4	kg/s	"Hava debisi"
$m_w$	11,1	kg/s	"Sprej suyu debisi"
$m_p$	4,17	kg/s	"Proses suyu debisi"
$P_a$	101325	Pa	"Dış hava basıncı"
$\rho_{air}$	1,157	kg/m <sup>3</sup>	"Hava yoğunluğu"

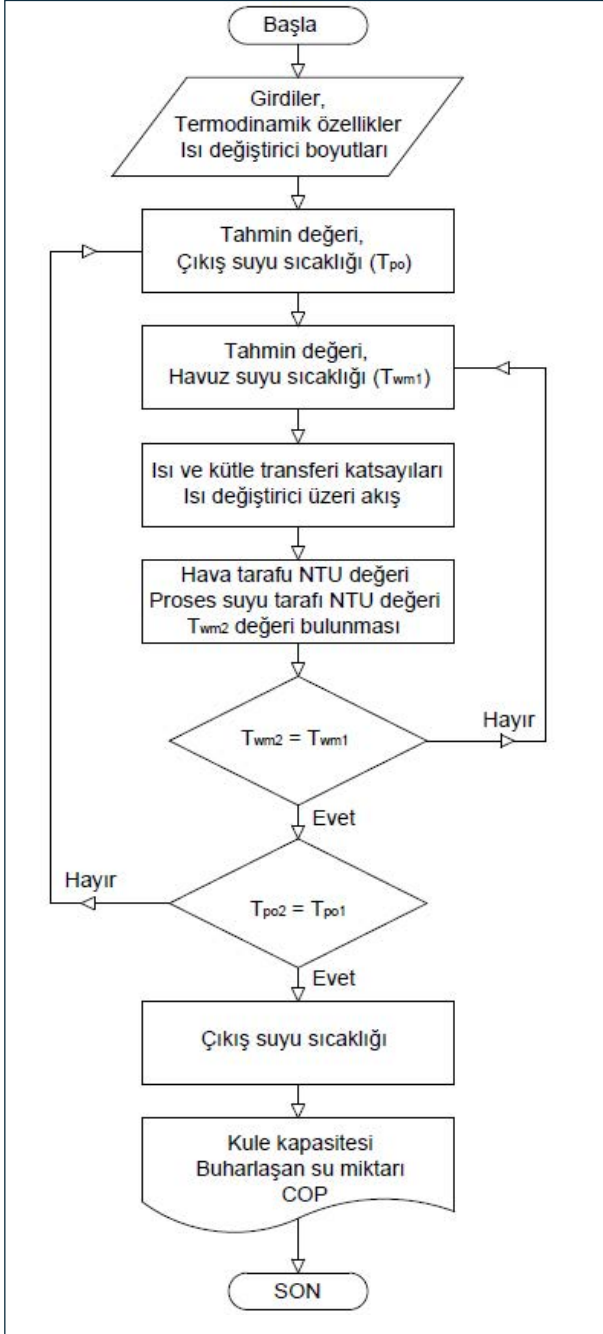
Sonraki aşamada ısı değiştiricisinin tasarımsal parametreleri tanımlanmaktadır. Yataydaki boru ve düşeydeki sıra sayıları, boru uzunluğu, boru ve sıralar arası mesafeler ile boru iç ve dış çapları tanımlanmıştır. Isı değiştirici bakır borudan üretildiği için bakırın ısı iletim katsayısı da tanımlanmıştır.

Tablo 2. Isı değiştirici geometrisi.

SİMGE	DEğER	BİRİM	TANIM
$n_{boru}$	22	-	"Boru sayısı"
$n_{sıra}$	16	-	"Sıra sayısı"
$L$	1000	mm	"Boru uzunluğu"
$d_b$	60	mm	"Borular arası mesafe"
$d_s$	25	mm	"Sıralar arası mesafe"
$d_o$	19	mm	"Dış çap"
$d_i$	17,65	mm	"İç çap"
$k_s$	400	W/mK	"Bakır iletim katsayısı"

#### 4.2. Çözüm Algoritması ve Elde Edilen Değerler

Sayısal çalışmalar için EES programında bir çözüm algoritması oluşturulmuştur. Soğutma kulesi hesap algoritması Şekil 3'te gösterilmiştir.



EES programında girdiler kısmı tanımlandıktan sonraki aşamada termodinamik hesaplamalar yapılmaktadır. Kuleye giren hava ve su buharının özgül ısıları ve nem oranı, giren hava - su buharı karışımı entalpisi, ortalama sprey sıcaklığında hava ara yüzündeki doymuş hava entalpisi, ortalama sprey suyu

sıcaklığında doymuş hava entalpisi hesaplanmaktadır. Isı ve kütle transferi katsayıları Nitsu ve Arkadaşları tarafından önerilen korelasyonlar ile elde edilmiştir. Boru içi ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Sprey suyu sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklığı hesaplamalarda tahmin olarak alınmakta ve değerleri sürekli güncellenerek gerçek değerlerine iterasyonlar sonucu ulaşmaktadır. Hesaplar sonucu gerçek çıkış suyu sıcaklığı, ortalama sprey suyu sıcaklığı, COP değeri ve buharlaşan sprey suyu miktarı bulunmaktadır.

#### 4.3. Yaş Termometre Sıcaklığı Etkisi

Yaş termometre sıcaklığı kuleye çekilen ortam havasının sıcaklık ve bağıl nemine bağlı olarak hesaplanan ve soğutma kulesinin kapasite tahmininde dramatik etkiye sahip bir değerdir. Bu sıcaklık, hava ile su temasında su kütlesinin düşebileceği en düşük sıcaklık değeri olarak tanımlanmaktadır.

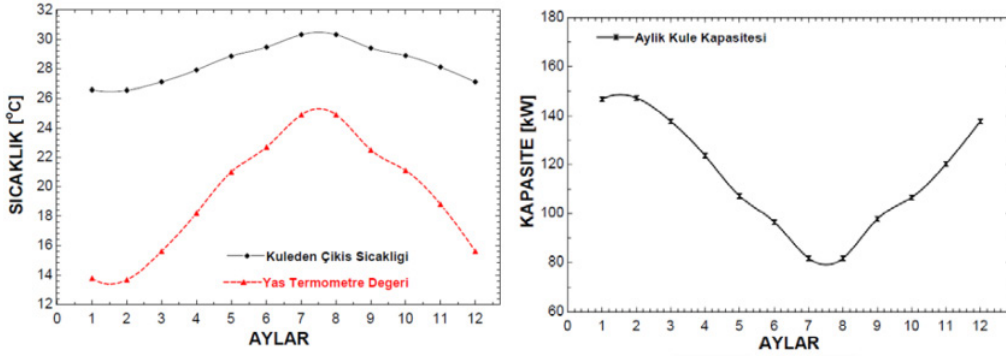
Kapasite tahminleri yapılırken ilk olarak soğutma kulesinin çalışacağı şehrin/bölgenin yaş termometre sıcaklığı girdi olarak hesaplara dâhil edilmelidir. Kış aylarında hava sıcaklığının düşük olması sebebi ile düşen yaş termometre sıcaklığı yaz aylarında en yüksek değerlerine ulaşır. Yüksek yaş termometre sıcaklıklarında soğutma kapasitesi düşmekte, düşük değerlerde ise soğutma kapasitesinde artış olmaktadır. En sıcak günlerde bile soğutma kulesinin yeterli kapasite verebilmesi istendiğinden, şehir veya bölgelerin yaz aylarındaki ortalama en yüksek yaş termometre sıcaklık değerleri ile hesaplamalar yapılmaktadır.

EES programında İzmir ilinin 2017 yılı boyunca aylık olarak sahip olduğu ortalama yaş termometre sıcaklık değişiminin Tablo 1. ve Tablo 2'de verilen tasarımsal özelliklere sahip bir kapalı çevrim soğutma kulesinin kapasitesine olan etkisi incelenmiştir. Yaş termometre değerinin düştüğü kış aylarında kapasite artmaktadır. Yaz aylarında ise çıkış suyu sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak kapasite değeri düşmektedir. Yaş termometre sıcaklığı değişiminin kapasite ve ısı değiştirici çıkış sıcaklığına olan etkisi Şekil 4'te verilmiştir. Yaş termometre değeri yükseldikçe, kulenin aynı sıcaklık değerine soğutabileceği proses suyu miktarı azalmakta ve kapasitesi buna bağlı düşmektedir.



Tablo 3. İzmir ili 2017 aylık ortalama yağ termometre değerleri. [15]

Oca.	Şub.	Mar.	Nis.	May.	Haz.	Tem.	Ağu.	Eyl.	Eki.	Kas.	Ara.
13,8	13,7	15,6	18,2	21,0	22,7	24,9	24,9	22,5	21,1	18,8	15,6

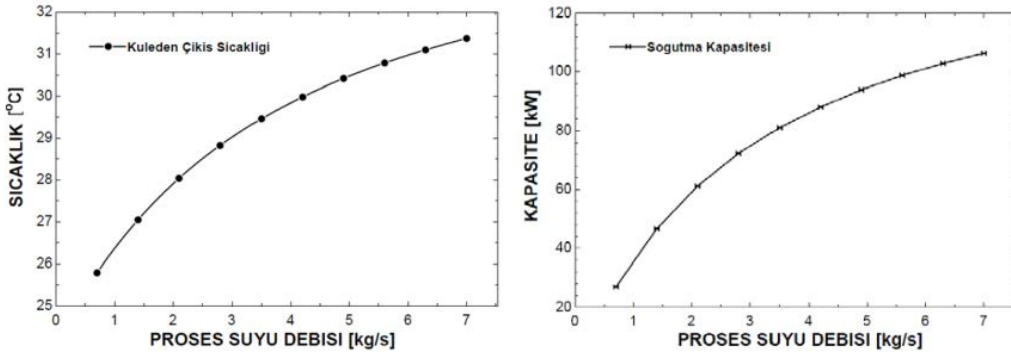


Şekil 4. İzmir ili aylık ortalama yağ termometre değeri etkisi.

#### 4.4. Proses Suyu Debisi Etkisi

Soğutulmak istenen proses suyu debisi, ısı değiştiricisi çıkışındaki su sıcaklığına etki eden diğer bir önemli parametredir. Proses suyu debisi arttıkça ısı değiştiricisinden soğutularak çıkan suyun sıcaklığında yükselme meydana gelmektedir. Proses suyu debisinin artmasının diğer bir etkisi ise 1 numaralı denklemde görüleceği üzere soğutma kulesinin kapasitesini artırmaktadır.

Şekil 5'de, sabit sıcaklıkta ısı değiştiricisine giren proses suyunun debisindeki değişimin, Tablo 1. ve Tablo 2'de verilen tasarımsal özelliklere sahip bir kapalı çevrim soğutma kulesinin kapasitesine olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 5. Proses suyu debisinin çıkış sıcaklığı ve kapasiteye etkisi.

Üstte verilen grafiklerden görüleceği üzere, soğutulacak proses suyu debisi artırıldığında, kulenin soğutabildiği en düşük sıcaklık değeri yükselmesine rağmen kapasitede de artış olmaktadır.

#### 4.5. Sprey Suyu Debisi Etkisi

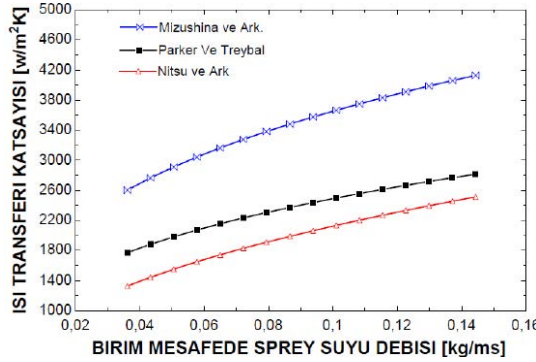
Sprey suyu filmi ile boru arasında ısı transferi katsayısının bulunması amacıyla pek çok korelasyon üretilmiştir. Literatürde bu konuda çalışan ilk isimlerden olan Parker ve Treybal, Mizushina ve ark., Nitsu ve Ark. gibi isimler ısı transferi katsayısının sprej suyu debisinin doğrusal fonksiyonu olduğunu göstermişlerdir. [1]

Bazı ısı transferi korelasyonları; [1]

Parker ve Treybal.	$h_w = 704(1,3936 + 0,02214T_{wm})(\Gamma_m/d_o)^{0,333}$	(W/m <sup>2</sup> K) (17)
Mizushina ve Ark.	$h_w = 2103 \times (\Gamma_m/d_o)^{0,333}$	(W/m <sup>2</sup> K) (18)
Nitsu ve Ark.	$h_w = 990 \times (\Gamma_m/d_o)^{0,46}$	(W/m <sup>2</sup> K) (19)

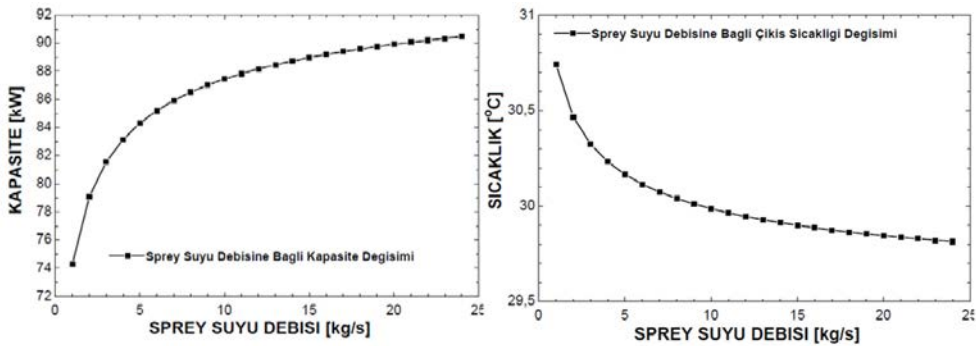
Literatürdeki diğer araştırmacılar da kendi çalışmalarında sprej suyu debisinin değiştiği durumlarda ısı transfer katsayısını gözlemlemişler ve deneysel korelasyonlar elde etmişlerdir. Spreylenen su debisinin artması ile ısı transferi katsayısı artmakta buna bağlı olarak ısı değiştiricisi içerisinde dolaşan proses suyunun daha düşük sıcaklıklara soğutulabilmesi sağlanmaktadır.

Bu durum soğutma kulesinin kapasitesini artırmaktadır. Şekil 6'da Parker ve Treybal, Mizushina ve Nitsu'nun elde ettiği ısı transferi katsayısı korelasyonları kullanılarak EES programı ile ısı transferi katsayılarının sprej suyu debisine bağlı değişimleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. Farklı ısı transferi katsayılarının sprej suyu debisine bağlı değişimi.

Tablo 1. ve Tablo 2'de verilen tasarım parametreleri aynı kalmak koşulu ile sadece sprej suyu değeri değiştirilerek kule kapasitesi ve ısı değiştiriciden çıkan suyun sıcaklık değerleri sprej suyu debisi değişimine bağlı olarak EES programı ile incelenmiştir.

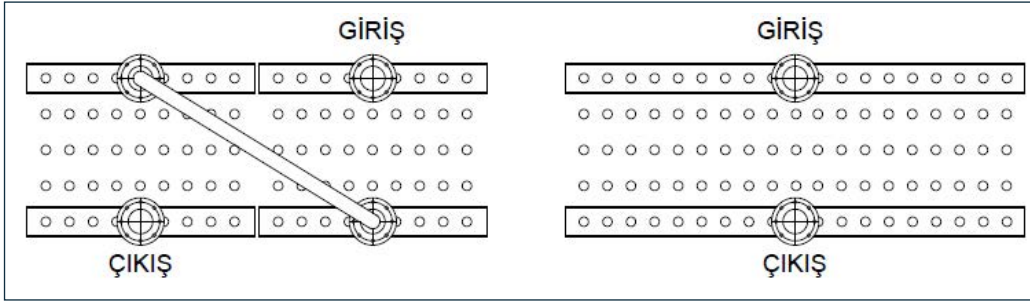


Şekil 7. Sprej suyu debisine bağlı çıkış sıcaklığı ve kapasite değişimi.

Şekil 7'de gösterildiği üzere sprej suyu debisi artışına ile soğutma kulesinin kapasite artışı doğru orantılıdır. Grafikten çıkarılacak diğer yorum ise, belirli bir noktaya kadar sprej debisi artışı kapasitede ciddi bir artış sağlarken o noktadan sonra sprej debisindeki artış kapasiteye fazla yansımamaktadır. Pompa motorunun fazla enerji sarfiyatına sebep olmamak için sprej suyu debisi optimum seviyeye çekilmesi gerektiği görülmektedir.

#### 4.6. Isı Değiştirici Tasarımı ve Bağlantı Şekli

Kapalı çevrim soğutma kulelerinde pek çok uygulamada cihaz içerisinde tek ısı değiştiricisi bulunmasına rağmen üreticiler son yıllarda tek ısı değiştiricisini boru sayısı ve boyutlarını sabit tutarak iki parçalı olacak şekilde tasarlamaktadırlar. Literatürdeki bazı uygulamalarda çift parçalı ısı değiştirici modeli incelenmiş olup soğutma kapasitesinde artış sağladığı belirlenmiştir. [9]



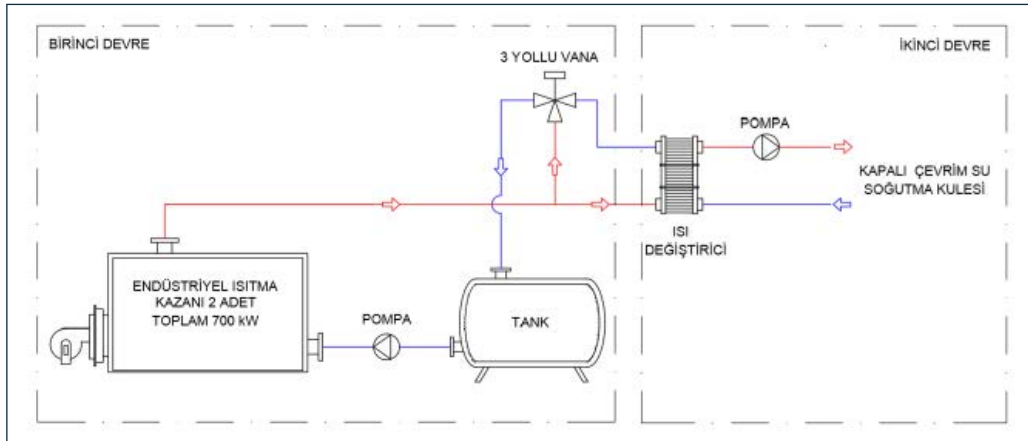
Çift parçalı ısı değiştiricisinde toplam ısı transferi katsayısının değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. Test Standı

Soğutma kulesi termal testlerinin yapıldığı test standı tesisatı şekil 9'da verilmiştir. Standı oluşturan ana bileşenler, ısı değiştirici, 3 yollu vana, tank, kazan pompa, boru hatları ve standın kontrol edildiği PLC sistemidir. Sistemi iki devre olarak parçalara ayırabiliriz. İlk devre, kazanların bulunduğu ısıtmanın sağlandığı bölümdür.

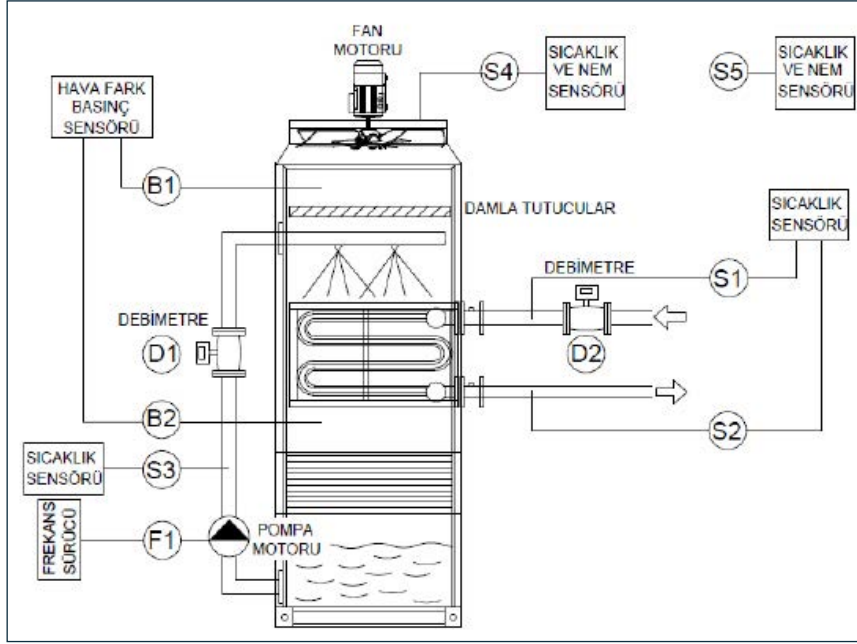
Toplam 700 kW kapasiteli iki kazanda ısıtılan su, bir pompa vasıtası ile hareketlendirilmekte ve PLC kontrollü bir 3 yollu vana vasıtası istenilen sıcaklıkta suyu ısı değiştiricisine yollamaktadır. İkinci devrede prototip test kulesinden gelen soğutulmuş suyun sıcaklığı ısı değiştiricisinde, istenilen değere getirilerek soğutma kulesine geri yollanmaktadır.



Şekil 9. Test standının şematik görünümü.

### 5.2. Deneysel Düzenek ve Yapılan Ölçümler

Soğutma kulesi termal testleri yapılırken tüm noktalardaki sıcaklık, nem ve debi değerlerinin kontrol edilmesi deneysel sonuçların yorumlanmasında büyük bir etkiye sahiptir. Şekil 10'da gösterilen ölçüm noktalarından, PLC kontrol sistemi vasıtası ile tüm sıcaklık ve debi değerleri anlık olarak gözlenmekte ve kayıt edilmektedir.



Şekil 10. Soğutma kulesindeki ölçüm sensörleri ve konumları.

D1 numaralı ultrasonik debimetre %0,5-1 hassasiyete sahip AFLO TTP marka, sprey suyunun debisini ölçmek için kullanılmış, D2 numaralı elektromanyetik debimetre %0,35 hassasiyete sahip AFLOWT marka, proses suyu debisi ölçümü için kullanılmıştır. S1, S2 ve S3 sıcaklık sensörleri  $\pm 0,3$  °C (25 °C) hassasiyete sahip PRODUAL marka boru içi daldırma tip NTC sensörlerdir. S4 sıcaklık ve nem sensörü  $\pm 0,5$  °C (0, +60 °C) hassasiyete sahip TESTO marka sıcak telli anometre, kule çıkış havasının nem ve sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. S5 sensörü  $\pm 2\%$  (0, 90 %nem) ve  $\pm 0,5$  °C (0 °C) hassasiyete sahip PRODUAL marka, kuleye giren dış havanın nem ve sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Kule içinde, fan tarafından yaratılan zorlanmış hava akışının, ısı değiştirici, sprey

dağıtım sistemi ve damla tutucularda yarattığı basınç farkını ölçmek için alt ve üst noktalara  $\pm 0,5$  Pa (+25 °C) hassasiyete sahip PRODUAL marka, B1 ve B2 fark basınç sensörleri yerleştirilmiştir. F1 kodlu ABB marka frekans sürücüsü ile pompa motoru kontrol edilmektedir. Motorun frekans değeri değiştirilerek pompa debisinde değişiklik yaratılmış ve farklı sprey suyu debilerinde testlerin yapılması sağlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda belirsizlik analizi yapılmıştır. 20 ve 21 numaralı denklemlerde gösterildiği üzere;  $n$  bağımsız değişken adedi,  $R$  ölçülecek boyut,  $x_1, \dots, x_n$  ölçümü etkileyen değişkenler,  $w_1, \dots, w_n$  bağımsız değişkenle ilgili hata oranı ve  $W_R$  toplam hata oranı olmaktadır. [16]

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

Buradan;

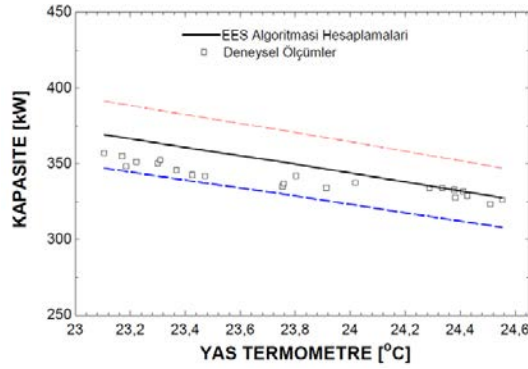
$$\frac{W_R}{R} = \left[ \left( \frac{w_{x_1}}{x_1} \right)^2 + \left( \frac{w_{x_2}}{x_2} \right)^2 + \left( \frac{w_{x_3}}{x_3} \right)^2 + \dots + \left( \frac{w_{x_n}}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

Deneysel çalışmalar için belirsizlik değeri kapasite değerlerinde %5,86 ve ısı transfer katsayısı değerlerinde %6,07 olarak hesaplanmıştır.

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR

DeneySEL olarak yürütülecek olan çalışmalar için prototip bir soğutma kulesi tasarlanmıştır. Isı değiştiricisi çift parçalı üretilmiş olup çapraz bağlantının etkisi incelenmiştir. Bakır boru kullanılan ısı değiştirici 19,05 mm çaplı borulardan kaydırılmış tip boru demeti düzeninde imal edilmiştir. 2300x2300 mm oturma alanına sahip soğutma kulesinin dış aksamı elektrostatik toz boyalı galvaniz sac malzemeden imal edilmiş olup yüksekliği 4500 mm'dir. Sprey debisi için bir pompa ve hava debisi için aksiyal fan kullanılmıştır. Sprey suyunun ısı değiştirici üzerine homojen dağılımını sağlamak için PVC borulardan imal

edilen bir dağıtım sistemi kullanılmıştır. Sprey suyunun damlacıklar halinde fanın atılmasını engellemek için damla tutucu adı verilen gözenekli PVC malzeme dağıtım sistemi ve fan arasına yerleştirilmiştir. Prototip cihaz, soğutma kapasitesi dâhilinde kapalı çevrim su soğutma kulesi ihtiyacı olan herhangi bir gerçek uygulamada kullanılabilecek şekilde imal edilmiştir. Yapılan deneyler sonucu, kule kapasitesinde değişim yaratan yaş termometre değeri etkisi, sprej suyu debisi etkisi toplam ısı transferi katsayısı değişimi, çapraz bağlantının etkisi incelenmiş COP değeri elde edilmiştir. DeneySEL çalışmalar her bir durum için en az 4 tekrar test ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. Yaş termometre değerine bağlı kapasite değişimi.

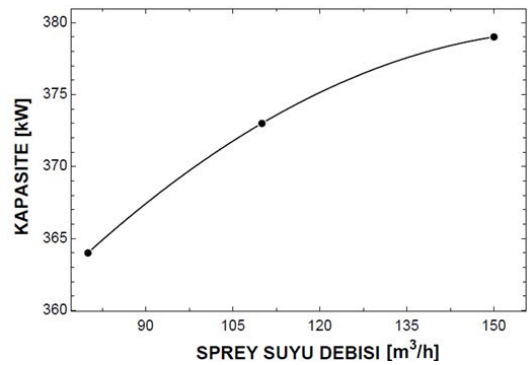
Şekil 11'deki grafikte EES algoritması ile hesaplanan değerler ve deneysel sonuçlara bağlı olarak bulunan değerler gösterilmiştir. Ölçüm hassasiyeti analizine bağlı olarak elde edilen hassasiyet değeri kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. Yaş termometre sıcaklığı yükselirken kapasite değeri düşmektedir. Deneysel sonuçlar ile hesaplanan değerler arasındaki fark %5'ten küçük olmaktadır.

### 6.2. Proses Debisi Artışı Etkisi

Proses suyu debisinin kapasiteye etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Üç farklı debi değerinde giriş suyu sıcaklığı sabit 34°C olacak şekilde kuleye gönderilmiştir. 20°C yaş termometre sıcaklığında test Şekil 12'deki grafikte EES algoritması ile hesaplanan değerler ve deneysel sonuçlara bağlı olarak bulunan değerler gösterilmiştir. Ölçüm hassasiyeti analizine bağlı olarak elde edilen hassasiyet değeri kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. Proses suyu debisinin artışına bağlı olarak soğutma kulesi kapasitesi arttığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar ile hesaplanan değerler arasındaki fark %5'ten küçük olmaktadır.

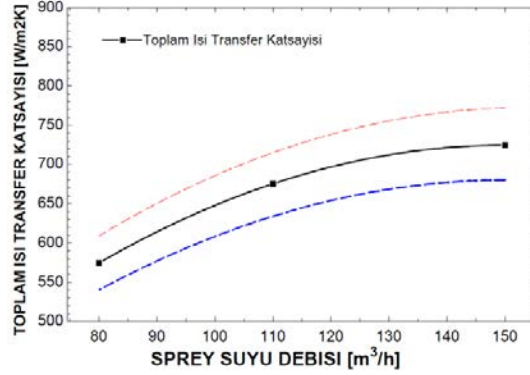
### 6.3. Sprej Suyu Debisi Etkisi

Sprej suyu debisinin kapasiteye etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Üç farklı sprej suyu debisi diğer tüm parametrelerin sabit tutulduğu durumlarda uygulanmış ve kapasiteye etkisi incelenmiştir.



Şekil 13. Sprej suyu debisi artışının kule kapasitesine etkisi.

Şekil 13'deki grafikte sprej suyu debisinin artışına bağlı olarak soğutma kulesi kapasitesi arttığı deneysel olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 14. Sprey suyu debisi artışının toplam ısı transferi katsayısına etkisi

Şekil 14.'de sprej suyu debisinin artışına bağlı olarak toplam ısı transferi katsayısı değişimi gösterilmiştir. Ölçüm hassasiyeti analizine bağlı olarak elde edilen hassasiyet değeri kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. Toplam ısı değişimi katsayısı sprej suyu debisi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Sprej suyu debisi değişimine bağlı COP değeri değişimi

Sprej Debisi (m <sup>3</sup> /h)	Enerji Sarfıyatı (kW)	Kapasite (kW)	$COP = \frac{Kapasite}{Enerji\ Sarfıyatı}$
150	10,4	379	36,4
110	10,4	373	35,9
80	10,4	364	35

Tablo 4.'te sprej suyu debisi değişimine bağlı COP değerindeki değişim verilmiştir. COP değerinin sprej suyu debisi ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

#### 6.4. Çapraz Bağlantı ve Toplam Isı Transferi Katsayısı Değişimi

Prototip modelde ısı değiştirici iki parçalı üretilmiştir. Düz bağlantıda proses suyu, ısı değiştiricinin ilk sırasındaki tüm borulara aynı anda girmektedir.

Çapraz bağlantıda ise proses suyu ısı değiştiricinin ilk yarısında dolaştıktan sonra ısı değiştiricinin ikinci yarısına girmekte ve proses suyunun ısı değiştirici içerisindeki hızı artırılmış olmaktadır. Buna bağlı olarak toplam ısı transfer katsayısında ve kule kapasitesinde artış olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.'te bu iki farklı bağlantı şeklinin deneysel olarak kapasite ve COP değeri üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Tablo 5. Sprej suyu debisi değişimine bağlı COP değeri değişimi.

Bağlantı Şekli	Sprej Debisi (m <sup>3</sup> /h)	Enerji Sarfıyatı (kW)	Kapasite (kW)	$COP = \frac{Kapasite}{Enerji\ Sarfıyatı}$
Normal	150	10,4	370	35,65
Çapraz	150	10,4	400	38,46

## SONUÇ

Kapalı çevrim bir soğutma kulesinin kapasitesinin doğru tahmin edilmesi için pek çok farklı parametrenin aynı anda incelenmesi gerekmektedir. Bu incelemeleri yapabilmek için çalışmada, Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılarak soğutma kulesinin termodinamik modellemesi yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar, modüler olarak imal edilmiş, boyutları ve kapasitesi bakımından sanayide kullanılabilir ve uygulanabilir bir soğutma kulesi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Sayısal hesaplar sonucu gerçek çıkış suyu sıcaklığı, ortalama sprej suyu sıcaklığı, COP değeri ve

buharlaşan sprej suyu miktarı bulunmaktadır. Algoritma, farklı termodinamik özellikler ve farklı ısı değıştirci boyutlarında soğutma kulesi kapasitesi hesaplamak için kullanılmaktadır.

Yaş termometre değeri arttığı durumlarda soğutma kulesi kapasitesi düşmektedir. Proses suyu debisi artırıldığında çıkış suyu sıcaklığı yükselmesine rağmen kule kapasitesinde artış meydana gelmektedir. Sprej suyu debisinin artışı ile kule kapasitesi ve COP değeri arasında doğru orantı vardır fakat belirli bir debi değeri sonrası

kapasiteye olan etkisi azalmaktadır. Bu sebepten dolayı pompa gücü göz önünde bulundurularak optimum sprej debisi belirlenmeli ve fazla enerji sarfiyatının önüne geçilmelidir. Isı değıştircinin çapraz bağlantısı ile toplam ısı transferi katsayısı, COP değeri ve kule kapasitesinde artış olmakta olduğu deneysel olarak belirlenmiş ve sanayiye yönelik uygulamalarda kullanılabilir bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Deneysel sonuçlar, sayısal olarak hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve hata oranı %5'in altında kaldığı belirlenmiştir. ■

## SEMBOLLER

$A$	Alan ( $m^2$ )
$c_p$	Özgül Isı ( $J/kgK$ )
$COP$	Performans katsayısı
$d$	Çap ( $m$ )
$h$	Isı transfer katsayısı ( $W/m^2K$ )
$h_d$	Kütle transfer katsayısı ( $kg/m^2s$ )
$h_w$	Isı transfer katsayısı ( $W/m^2K$ )
$i$	Entalpi ( $J/kg$ )
$k_s$	Isı iletim katsayısı ( $W/mK$ )
$m$	Kütleli debi ( $kg/s$ )
$T$	Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )
$U$	Toplam ısı transferi katsayısı ( $W/m^2K$ )
$Q$	Isı transfer oranı ( $W$ )
$\Delta T_{LM}$	Logaritmik ortalama sıcaklık farkı ( $C$ )
$\Gamma_m$	Birim mesafede sprej suyu debisi ( $kg/ms$ )

## ALT SİMGELER

$a$	Hava
$e$	Buharlaşma
$f$	Sıvı
$g$	Gaz
$i$	Giriş
$m$	Ortalama
$o$	Çıkış
$p$	Proses
$s$	Sprej
$sw$	Doymuş su
$w$	Sprej suyu, nem oranı

## KAYNAKLAR

- [1]KROGER, D.G., Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers Volume I, PennWell Corp., Oklahoma, USA, 2004.
- [2]PARKER, R. O., TREYBAL, R. E., The Heat, Mass Transfer Characteristics of Evaporative Coolers, Chemical Engineering Progress Symposium Series, 57-32:138–149, 1961.
- [3]MIZUSHINA, T., ITO, R., MIYASHITA, H. "Characteristics and methods of thermal design of evaporative coolers", International Chemical Engineering, 8, 3, pp532-538, 1968.
- [4]NITSU, Y., NAITO, K., ANZAI T., "Studies on Characteristics and Design Procedure of Evaporative Coolers," Journal of the Society of Heating Air-Conditioning Sanitary Engineers of Japan, vol. 41, no. 12, 1967.
- [5]DREYER. A.A., ERENS. P.J., "Analysis of evaporative coolers and condensers", Thesis, Department of Mechanical Engineering University of Stellenbosch, 1988.
- [6]LEIDENFROST, W., KORENIC, B., "Analysis of Evaporative Cooling and Enhancement of Condenser Efficiency and of Coefficient of Performance," Wärme und Stoffübertragung, 12:5–23, 1979.
- [7]HASAN, A., SIREN, K., "Theoretical and computational analysis of closed wet cooling towers and its applications in cooling of buildings", Energy And Buildings, 34, 477–486, FINLAND, 2002.
- [8]FACAO, J., OLIVIERA, A.C., "Thermal behaviour of closed wet cooling towers for use with chilled ceilings" Applied Thermal Engineering, 20, pp.1225-1236, PORTUGAL, 2000.

- [9]SHIM, G.J., SARKER, M.M.A., MOON, C.G., LEE, H.S., YOON, J., "Performance characteristics of a closed-circuit cooling tower with multiple paths heat transfer engineering", Heat Transfer Engineering, 31.12, 992-997, SOUTH KOREA, 2010.
- [10]BUDILHARDJO, B., NASRUDDIN, N., NUGRAHA, M.H., "Experimental and simulation study on the performance of counter flow closed cooling tower systems", International Journal Of Technology, vol. 6, no. 3, 2015.
- [11]ZHOU, Y., ZHU, X., DING, X., "Theoretical investigation on thermal performance of new structure closed wet cooling tower", Heat Transfer Engineering, 39(5), 460-472, 2017.
- [12]XIE, X., HE, C., ZHANG, B., CHEN, Q., "Heat transfer enhancement fort he coil zone of closed wet cooling tower through field synergy analysis", Computer Aided Chemical Engineering, 1927-1932, 2018.
- [13]MAHDI, Q.S., JAFFAL, H.M., "Experimental investigation for the thermal performance of modified closed wet cooling tower", College of Engineering Journal, Vol.19 No.2, pp.310 – 326, IRAQ, 2016.
- [14]INCROPERA, F.P., DEWITT. D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, no. 7, New York, USA, 1990
- [15]ASHRAE Handbook, 2017.
- [16]KLINE, S., J., McCLINTOCK, F., A., "Describing uncertainties in single-sample experiments," Mechanical Engineering, Jan. 1953.

## ÖZGEÇMİŞ

### Oğuz DALKIRAN

2015 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 2016 yılında başladığı Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Termodinamik Yüksek Lisans Programı'nda halen yüksek lisans öğrencisidir. Şu anda iklimlendirme sektöründe İmas İklimlendirme bünyesinde Makina Mühendisi olarak çalışmaktadır.

### Aytunç EREK

Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Bölümünde Profesör olarak çalışmaktadır. Termodinamik alanında Doktora derecesini 1999 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi'nden almıştır. Başlıca araştırma alanları, ısı değiştiricilerinin HAD analizleri ve ısı enerji depolama sistemleridir. Türk Tesisat Mühendisleri Derneği ve Makine Mühendisleri Odası üyesidir. Isıl enerji depolama sistemleri konusunda hakemli dergi ve konferanslarda yayınlanmış çok sayıda bilimsel çalışması bulunmaktadır.

---

Bu makale, 17-20 Nisan 2019 tarihleri arasında gerçekleştirilen 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi'nde yayınlanmıştır.