

BUHARLAŞTIRMALI SOĞUTUCULARDA SERPANTİN İLE SU PÜSKÜRTÜCÜLERİ ARASINDAKİ BÖLGEDE ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Hilmi Cenk BAYRAKÇI, Arif Emre ÖZGÜR ve Mehmet KUNDUZ

İklimlendirme-Soğutma Programı, Senirkent MYO, Süleyman Demirel Üniversitesi, 32600, Senirkent, Isparta
Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 32260, Isparta
Makine Mühendisliği Bölümü, Müh.-Mim. Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 32260, Isparta
cenk@sdu.edu.tr, ozgur@tef.sdu.edu.tr, mkunduz@mmf.sdu.edu.tr

(Geliş/Received: 02.03.2006; Kabul/Accepted: 12.03.2007)

ÖZET

Bu çalışmada, buharlaştırmalı soğutucularda serpantin ile su püskürtücüleri arasında kalan bölgedeki ısı ve kütle transferi mekanizmaları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmamızın konusu olan bölge için, deneysel düzenek hava ile su karşıt akım oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmanın amacı, incelenen bölgedeki volümetrik ısı ve kütle transfer katsayılarının deneysel ölçümler ve bir matematiksel model yardımıyla elde edilmesidir. Deneysel sonuçlar bilgisayar programı tarafından, Runge-Kutta metodu ve iterasyon yöntemi kullanılarak, analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, grafiksel ve ampirik ifadeler ile verilmiştir. Bu ifadelerde değişken parametreler hava hızı, su debisi ve çalışma bölgesi yüksekliği olarak alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Buharlaştırmalı soğutucu, ısı ve kütle transferi, serpantin ve püskürtücüler.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF HEAT AND MASS TRANSFER BETWEEN SERPENTINE AND WATER SPRAYS IN EVAPORATIVE COOLERS

ABSTRACT

In this study, heat and mass transfer mechanisms are experimentally determined in the area which is between serpentines and sprays of an evaporative cooler. For the area which is the subject of our study, experimental system has been designed in a way that air and water makes opposite flow. The aim of this study is to obtain volumetric heat and mass transfer coefficients being examined in the area, with the support of experimental measurements and mathematical model. Experimental results have been solved via a computer program by using Runge Kutta and iteration method. The results obtained from the experiments have been given as graphically and empirical statements. In these statements changing air velocity, water flow rate and height of study area were taken variable parameters.

Keywords: Evaporative condenser, heat and mass transfer, serpentines and sprays.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İklimlendirme-soğutma sistemlerinde, imalat sanayinin proses soğutma kısımlarında, termik santrallerde egzoz buharının yoğunlaştırılmasında ve sıvı soğutulmasında buharlaştırmalı soğutucular yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Buharlaştırmalı soğutucular gerek işlevleri, gerekse yapıları bakımından bazı yönleri ile benzeyip bazı yönleri farklı olsa bile, termodinamik olarak hesaplanmalarında çok benzerlikler vardır. Bu

cihazların hepsinde, ısı ve kütle geçişi nemli hava ile su arasında olmaktadır. Buharlaştırmalı soğutucular için şimdiye kadar yapılan çalışmaların hemen hepsinde, kullanılan veya hesaplanan ısı transferi katsayısı değerleri, serpantin ile su girişi arasında kalan bölgenin etkisi serpantin bölgesine dâhil edilerek hesaplanmaktadır. Bu tutum hatalı bir uygulamadır. Serpantin ile su girişi arasındaki bölgede oluşan ısı transferinin ve kütle transferinin ayrıca belirlenmesi gerekmektedir.

Soğutucudan çıkan hava ve sirkülasyon suyu sıcaklığının hesaplanmasında, bundan dolayı, serpantin ile soğutucuya su giriş bölgesi (fiskiye) arasında kalan hacimdeki ısı ve kütle transferi katsayılarının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışma belirlenen bölgedeki ısı ve kütle transferi katsayıları değerlerinin belirlenmesi için önem arz etmektedir.

Çalışmada dikkate alınan bölgedeki ısı ve kütle transferini, değerlendiren çalışmalardan biri Webb'in yaptığı çalışmadır [1]. Webb, soğutma kulelerinde suyun ve havanın etkileşimde bulunduğu yüksekliğin, doğrudan kule dolgu yüksekliği olarak alınmayacağını belirtmiştir. Bu yüksekliğe suyun bir nozuldan (püskürtücüden) püskürtüldüğü dolgu öncesi hacmin yüksekliğinin ve dolgudan sonra, dolgu bitimi ve su havuzundaki su yüzeyi arasında kalan hacmin yüksekliğinin de ilave edilmesi gerektiği belirtilmektedir.

Kunduz, buharlaştırılmalı yoğunlaştırıcıların ısı hesabı ile ilgili bir çalışma yapmıştır [2]. Bu çalışmada yapılan kabulde, püskürtülen su ile hava arasında, su yoğunlaştırıcı serpantin boru demetine ulaşmaya kadar ve boru demetinden çıktığı andan itibaren su toplayıcısına ulaşmaya kadar ısı ve kütle transferi olaylarının olmadığı belirtilmiştir.

Peterson vd. tarafından yapılan bir çalışmada su püskürtücüleri ile serpantin arasında kalan bölge ve serpantin sonrası ile hava giriş açıklığı arasında kalan bölgedeki ısı transferi ve kütle transferini ihmal etmişlerdir [3]. Peterson ve arkadaşları bu bölgedeki transfer olaylarının dikkate alınabileceğini ayrıca belirtmişlerdir.

Stefanovic vd., bir soğutma kulesi içerisinde gerçekleşen ısı ve kütle transferinin, yalnızca kule dolgusu bünyesinde olduğunu kabul etmenin hatalı olduğunu vurgulamışlardır [4]. Soğutma kulesi içinde püskürtücü bölgesinin ve hava giriş açıklığı ile dolgu arasında kalan bölgenin, ısı transferinde ve kütle transferinde etkin rol oynadıkları belirtmişlerdir. Su debisinin yüksek olduğu sistemlerde, bu iki bölgenin etkisinin daha çok arttığını ve bu iki bölgedeki yağmur hacminin dolgu hacminden daha büyük değerlere ulaşabileceğini belirtmişlerdir. Böyle durumlarda alışlagelmiş hesaplama yöntemlerinin yanlış sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca Stefanovic vd. kendi çalışmaları da dahil olmak üzere, bu durumları, dikkate alan hiçbir çalışmanın olmadığını belirtmişlerdir.

2. DENEYSSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

Buharlaştırılmalı sistemlerden olan mekanik çekişli karşıt akışlı buharlaştırılmalı soğutucularda, akışkanın soğutulduğu serpantin ile su girişi olan püskürtücüler (fiskiye) arasında kalan bölgedeki ısı ve kütle

transfer mekanizmaları bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Bu bölgede borulardan gelen su, püskürtücülerden belirli bir hızla ve açıyla serpantin borular üzerine akışkanı soğutmak amacıyla püskürtülmektedir. Deneysel çalışma için, buharlaştırılmalı bir soğutucu imal edilerek kullanılmıştır. Deney düzeneği Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi laboratuvarında imal edilmiş ve deneyler burada yapılmıştır. Deney yapılan yerin rakımı 1050'dir. Bu buharlaştırılmalı sistem, 40 cm x 40 cm kesit alanına ve 260 cm yüksekliğe sahiptir.

Şekil 1'de gösterilen deney düzeneğinde, alt kısımda 3 no'lu su havuzunda toplanan su, 4 ve 5 no'lu pompalar vasıtasıyla, 8 no'lu ısıtıcı üniteye yani kazana basılmaktadır. Pompaların debisinin fazla veya az olması durumunda 6 no'lu su debisi ayarlama (by-pass) vanası kullanılarak, debi ayarı yapılmaktadır. Su debisi miktarı 9 no'lu debimetreden gözlenmektedir.

Ayrıca kazandan çıkan su sıcaklığının istenilenden yüksek olması durumunda, 7 no'lu su sıcaklık ayar vanası kullanılarak, pompalardan çıkan su, kazan suyu ile karıştırılarak istenilen sıcaklık sağlanmaktadır. İstenilen sıcaklık derecesine ulaşan su, 1 no'lu püskürtücüden püskürtülerek, 2 no'lu boru demetlerinin üzerinden akarak, alt kısımda su toplama havuzunda birikmekte ve çevrim bu şekilde sürmektedir.

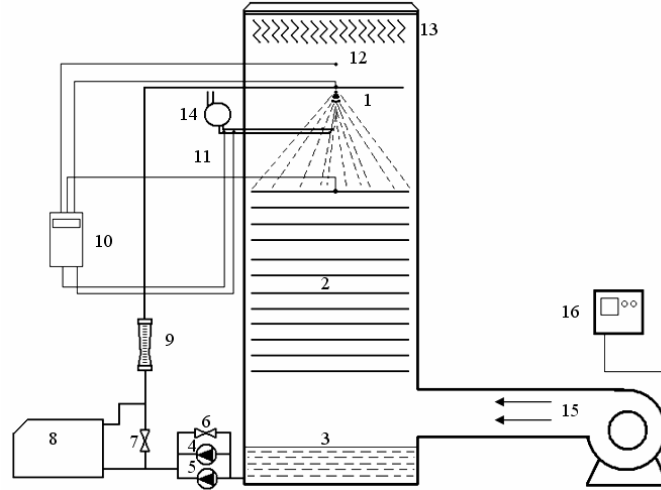
Hava ise 15 no'lu radyal fan vasıtasıyla sisteme girmektedir. Çekilen hava deney düzeneğinin bulunduğu ortamdan dış ortama verilmekte, böylece sistemden çıkan özellikleri değişmiş havanın tekrar sisteme girmesi engellenmektedir.

Sisteme giren havanın hızı, bir radyal fan ve fan devrini kontrol eden frekans konvertörü yardımıyla dört farklı değer olarak sağlanmıştır. Frekans konvertörü ile frekans değiştirilerek fanın devri kontrol edilmekte ve devrin değişmesi ile hava hızı 2 ila 3,5 m/s arasında (2-2,5-3 ve 3,5 m/s) değişmektedir. Özetle motor devri frekans konvertörü tarafından değiştirilerek farklı hava hızı değerleri elde edilmiştir. Deneysel çalışma için sistemdeki su akışı da dört farklı değerde sağlanmıştır. Bu değerler 3,5, 3, 2,5 ve 2 kg/m²'s'dir.

Deneysel çalışmada, sırasıyla 0,5-0,4-0,3 ve 0,2 m püskürtme bölgesi yüksekliklerinde çalışılmıştır. Her yükseklikte farklı su akıları ve hava hızı değerleri ile çalışılarak, su ve havanın giriş ve çıkış sıcaklıkları ile havanın giriş ve çıkış özgül nem değerleri ölçülmüştür.

3. ÇÖZÜM METODU (SOLUTION METHOD)

Literatürdeki çalışmalar ışığında, su damlaları ve hava arasındaki ısı ve kütle transferini matematiksel olarak



Şekil 1. Şematik olarak deney düzeneğinin gösterimi, 1. Su püskürtücüsü, 2. Boru demetleri, 3. Su toplayıcısı, 4 ve 5. Su besleme pompaları, 6. Su debisi ayarlamaya vanası, 7. Su sıcaklık ayarı (by-pass) vanası 8. Isıtıcı ünite (Kazan), 9. Debimetre, 10. Veri okuyucu ve kaydedici cihaz, 11. Sıcaklık ve nem ölçüm problemleri, 12. Anemometre, 13. Damla tutucu, 14. Radyal fan (hava nemi ölçümü için), 15. Radyal fan (besleme havası için), 16. Frekans konvertörü (Projection of schematic experimental system, 1) Spray 2) Serpentine 3) Storage tank 4 and 5) Pumps 6) By-pass valve 7) Water temperature adjustment valve 8) Heater 9) Flowmeter 10) Data Logger 11) Temperature and air humidity probes 12) Anemometer 13) Drift eliminators 14) Radial fan (for air humidity measurement) 15) Radial fan (for feeding air) 16) Frequency converter)

modellemek için bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir.

İncelenen bölge boyunca ısı transferi ve kütle transferi katsayıları ortalama katsayılar olarak alınmıştır. Sistem sürekli rejimdedir, buharlaştırılmalı soğutucu duvarlarından atmosfere olan ısı transferi ihmal edilebilir bir büyüklüktür. Isı transferi ve kütle transferi yalnızca akışlara dik doğrultuda gerçekleşmektedir, çalışma bölgesinin her seviyesinde üniform sıcaklık dağılımı vardır. Suyun özgül ısı ve havanın özgül ısısının sıcaklıkla değişimi diferansiyel denklemlerin türetilmesinde ihmal edilmiş, bu denklemlerin çözüm aşamasında ise değişim dikkate alınmıştır. Isı transferi ve kütle transferi aynı ara yüzey alanında gerçekleşmektedir. Çalışılan bölgede püskürtücülerden çıkan su damlaları çok küçük olduğundan su ile hava arasındaki ara yüzey sıcaklığı, su sıcaklığına eşit olarak alınmıştır. Suyun incelenen bölgede homojen olarak dağıldığı kabul edilmektedir.

Çalışma bölgesindeki ısı ve kütle transfer mekanizmaları, Şekil 2’de gösterilen kontrol hacmi ile açıklanabilir. Şekil 2’de gösterilen kontrol hacmine göre kütle denge denklemi yazılırsa;

$$\dot{m}_s = \dot{m}_h dx \quad (1)$$

denklemi bulunur. Buharlaştırmadan dolayı dF yüzeyli soğutma suyu yüzeyinden hava hacmine giren su buharı kütlesi için,

$$\dot{m}_s = \sigma(x_s - x)dF \quad (2)$$

yazılabilir. (1) ve (2) ifadelerinden,

$$\dot{m}_h dx = \sigma(x_s - x)dF \quad (3)$$

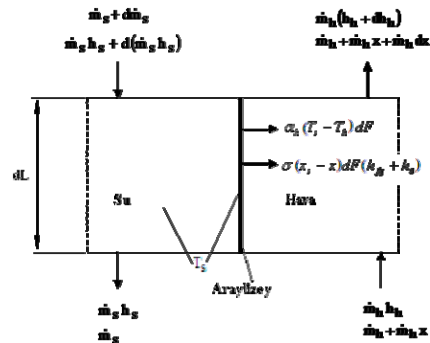
ifadesi elde edilir. Burada x_s , havanın T_d yani su yüzeyi sıcaklığındaki doyma özgül nem değeridir ve denklem (4) ve (5) yardımıyla hesaplanabilir (Kunduz, 1992). Bu ifadelerde su yüzey sıcaklığı, su sıcaklığına eşit kabul edildiğinden, “s” indisi aynı zamanda doyma durumunu “d” simgelemektedir ve $x_s = x_d$ alınabilir.

$$x_d = 0,622 \frac{P_d}{P_{atm} - P_d} \quad (4)$$

olur.

$$P_d = 10^{\left(\frac{7,5T_s}{237,5+T_s} + 2,7859 \right)} \quad (5)$$

Bu ifade, suyun T_s sıcaklığındaki buhar basıncıdır ve



Şekil 2. Su ile hava arasındaki ısı ve kütle transferi kontrol hacimleri (Heat and mass transfer control volumes between water and air)

Tetens ilişkisi olarak adlandırılır.

Su ve hava arasında ısı ve kütle transferinin gerçekleştiği birim ara yüzey alanı dF ile gösterilir. Bu alan (2) no'lu denklemde kullanılmış ve Şekil 2'deki kontrol hacminde gösterilmiştir. Bu alan şöyle tanımlanabilir;

$$F = A L a \quad (6)$$

Burada, L (m), çalışılan bölge yüksekliği, yani püskürtücü ile serpantin arasındaki mesafe, A (m^2) buharlaştırmalı soğutucu enine kesit alanı ve a (m^2/m^3) ise su damlalarından oluşan $1 m^3$ lük hacimdeki ısı transfer yüzeyi olarak ifade edilebilir. Eğer $A = 1 m^2$ olarak seçilirse dF ifadesini şöyle yazabilmek mümkündür:

$$dF = a dL \quad (7)$$

Şekil 2'deki su-hava kontrol hacminde, enerji denge denklemi yazılacak olursa;

$$\dot{m}_s h_s + d(\dot{m}_s h_s) - \dot{m}_s h_s = \dot{m}_h (h_h + dh_h) - \dot{m}_h h_h \quad (8)$$

bulunur. Bu ifade düzenlenerek,

$$\dot{m}_s dh_s + d\dot{m}_s h_s = \dot{m}_h dh_h \quad (9)$$

ifadesi elde edilir. Şekil 2'de görülen su kontrol hacmi için enerji denge denklemi yazılacak olunursa;

$$\dot{m}_s dh_s = [\alpha(T_s - T_h) + \sigma(x_s - x)(h_{fg} + h_s)]dF \quad (10)$$

elde edilir. Burada h_{fg} suyun T_s sıcaklığındaki buharlaşma gizli ısıdır. (10) ifadesindeki h_s terimi yani suyun T_s sıcaklığındaki entalpisi literatürde çoğunlukla ihmal edilmektedir. (10) ve (3) ifadeleri birlikte düzenlenir ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa;

$$\frac{dh_h}{dx} = \frac{\alpha(T_s - T_h)}{\sigma(x_s - x)} + h_{s,b} \quad (11)$$

ifadesi elde edilir. Burada $h_{s,b} = h_{f,g} + h_s$ 'dir. h_h terimi nemli havanın entalpisini ifade etmektedir. Nemli havanın sabit basınçtaki özgül ısı

$$c_p = c_{p,h} + c_b x \quad (12)$$

olur. İfadeleri tekrar düzenlenip, gerekli sadeleştirmeler yapılırsa,

$$dT_h = \frac{(T_s - T_h)}{\dot{m}_h c_p} [\alpha + \sigma(x_s - x)c_b] \quad (13)$$

eşitliği bulunur. Sistemdeki, yani buharlaştırmalı soğutucudaki, su ile hava arasında gerçekleşen eş zamanlı ısı ve kütle transferi problemlerinin çözümünde, "Lewis faktörü" olarak bilinen boyutsuz bir sayı kullanılır. Lewis faktörü Bosnjakovic (1965) tarafından;

$$Le = \frac{\sigma c_p}{\alpha} \quad (14)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Bu sayı tanımı ile (2), (3), (10) ve (13) ifadelerinde Le sayısı gerekli yerlere konarak diferansiyellerin dL terimine göre değişimleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{d\dot{m}_s}{dL} = \frac{\alpha a Le}{c_p} (x_s - x) \quad (15)$$

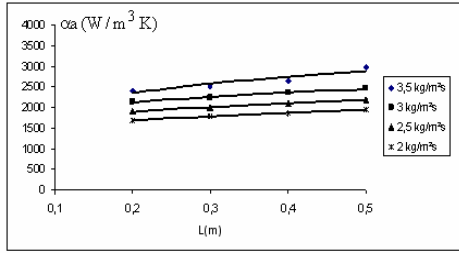
$$\frac{dx}{dL} = \frac{\alpha a Le}{c_p m_h} (x_s - x) \quad (16)$$

$$\frac{dT_s}{dL} = \frac{1}{m_s c_s} \left[\alpha a (T_s - T_h) + \frac{\alpha a}{c_p} Le (x_s - x) (h_{s,b} - h_s) \right] \quad (17)$$

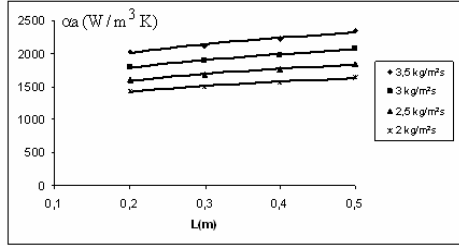
$$\frac{dT_h}{dL} = \frac{\alpha a Le (T_s - T_h)}{c_p m_h} \left[\frac{1}{Le} + \frac{c_b}{c_p} (x_s - x) \right] \quad (18)$$

Bu denklemler, Şekil 2'de gösterilen diferansiyel kontrol hacminde dL mesafesi boyunca, sırasıyla buharlaşan su kütlesi sebebi ile su debisindeki değişimi, serbest hava akımının özgül nem değerinin değişimini, su sıcaklığının değişimini ve hava sıcaklığının değişimini ifade etmektedir.

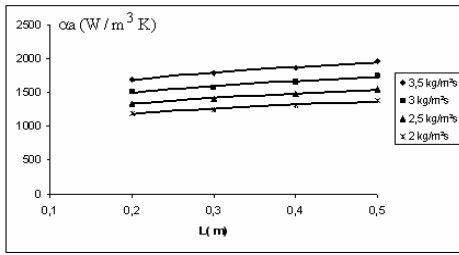
Yukarıdaki modelde anlatılan ve çözümde kullanılan (15), (16), (17) ve (18) denklemleri lineer denklemler değildirler. Dolayısıyla çözüm için doğrudan integralleri alınamaz. Bu nedenle bu denklemlerin çözümü için başka metodlar kullanılmak zorundadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, bu tür denklemlerin çözümünde Merkel tarafından sunulan "Entalpi Potansiyeli" olarak da bilinen "adım adım integrasyon metodu" veya "Runge-Kutta Metodu"nun daha çok kullanıldığı görülmüştür. Adım adım integrasyon metodu daha az hassas bir yöntemdir. Bu yöntemde, buharlaştırmalı soğutucu veya soğutma kulesi vb. sistemde, su ve hava arasında ısı ve kütle transferinin gerçekleştiği yükseklik (L), belirli sayıda kademeye ayrılır. Her kademedan suyun çıkış sıcaklığı bir sonraki kademenin giriş şartlarını belirler. Havanın yaş termometre sıcaklığı havanın giriş entalpisini belirler. Bu nedenle bu yöntemin uygulanabilmesi için sisteme giren ve sistemden çıkan su sıcaklığı ile sisteme giren havanın yaş termometre sıcaklığının bilinmesi gerekir [5].



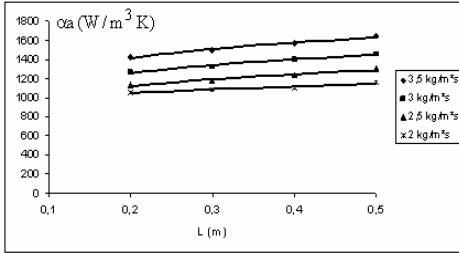
Şekil 3. 3,5 m/s hava hızında α_a katsayısının, su akıları ve yükseklik ile değişimi (Variation of α_a coefficient by water flux and height at 3,5 m/s air velocity)



Şekil 4. 3 m/s hava hızında α_a katsayısının, su akıları ve yükseklik ile değişimi (Variation of α_a coefficient by water flux and height at 3 m/s air velocity)



Şekil 5. 2,5 m/s hava hızı değerinde α_a katsayısının, su akıları ve yükseklik ile değişimi (Variation of α_a coefficient by water flux and height at 2,5 m/s air velocity)



Şekil 6. 2 m/s hava hızında α_a katsayısının, su akıları ve yükseklik ile değişimi (Variation of α_a coefficient by water flux and height at 2 m/s air velocity)

Çalışma bölgesinde gerçekleşen ısı ve kütle transferi için, tahmini ısı ve kütle transferi katsayıları kabul edilir. Bu kabul edilen değerler ile hesaplama işlemlerine başlanır. Bu aşamada sislenme kontrolü yapılı ve sislenme durumunda kullanılacak denklem takımı seçilir. Daha sonra Runge-Kutta metoduyla çalışma bölgesi boyunca

$$\frac{dm_s}{dL}, \frac{dx}{dL}, \frac{dT_s}{dL} \text{ ve } \frac{dT_h}{dL}$$

değerleri, bilgisayar programı yardımıyla aynı anda hesaplanır. Burada elde edilen değerler bir sonraki adım için kullanılacaktır. Yani başka bir ifade ile

burada hesaplanan su debisindeki değişim, havanın nemi, hava sıcaklığı ve su sıcaklığı değerleri bu adımdan sonraki adımda kullanılır. Bu işlemler tekrarlanarak sistemden çıkan su ve sisteme giren havaya ait değerler elde edilir. Bu çalışmalar esnasında Runge-Kutta metodu için kabul edilen adım, $dL = 0,05$ m olarak alınmıştır. Hesaplama sonucunda bulunan, su ve havaya ait değerler ile deneysel çalışmalardan elde edilen ölçümler kıyaslanır. Bu değerler arasındaki fark kabul edilebilir bir seviyeye gelene kadar veya fark olmayana kadar, hesaplama işlemi tekrarlanır. Bu farklar istenen değerlerde değilse, yani aradaki fark bir türlü kapanmıyorsa, ısı ve kütle transferi katsayısı değerleri yanlış tahmin edilmiş demektir. Bu durumda, bu değerler değiştirilerek işlemler yeniden başlatılır. Bu katsayılar (α_a ve σ_a) için hesaplamalar sonucunda bölgeden çıkan su sıcaklığı, hava sıcaklığı ve çıkış havası özgül nemi değerlerine göre yeni tahmini katsayılar verilir. Hesaplanan değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki fark istenen seviyelere geldiğinde işleme son verilir. Çalışmalar esnasında yapılabilecek hata oranını azaltmak amacıyla su debisindeki değişim literatürdeki gibi ihmal edilmemiştir ve hesaplamalarda kullanılmıştır.

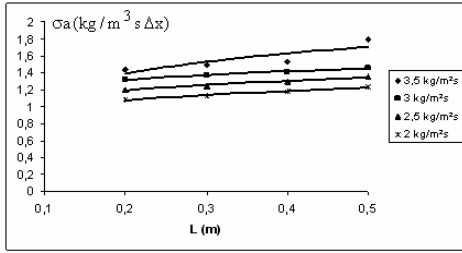
4. BULGULAR (RESULTS)

Ölçüm sonucu elde edilen tüm deneysel veriler, hazırlanan bilgisayar programında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler neticesinde α_a ve σ_a katsayılarının, değişen çalışma bölgesi yüksekliği ve su debilerine göre değişimleri, değişik hava hızlarında elde edilmiştir. Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da α_a katsayısının değişimi görülmektedir.

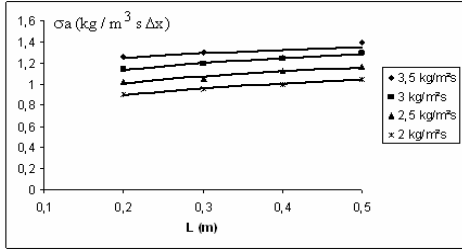
Şekil 3 incelendiğinde 3,5 m/s hava hızı için α_a katsayısı $3,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ su akısı değeri için en yüksek değerindedir. Daha sonra azalan su akısı değeri ile α_a katsayıları da azalmaktadır.

Şekil 5 ve 6'da hesaplanan katsayılarının değişimi görülmektedir. Burada da Şekil 3'te olduğu gibi, küçülen debi değeri ile katsayıları da düşmektedir. Şekil 7'de ise σ_a katsayısının su akısı ve yükseklik ile değişimi görülmektedir. Bu grafikte de deneysel çalışmada kullanılan değişik su akılarına göre kütle transfer katsayılarının değişimi verilmiştir.

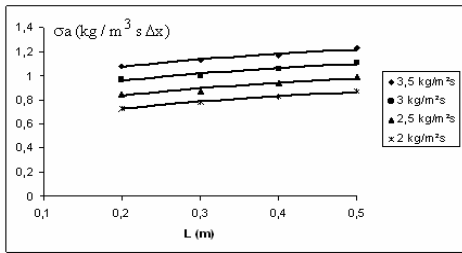
Şekil 8, 9 ve 10'da kütle transfer katsayılarının genel değişimine bakılacak olursa azalan su akısı değeri ile kütle transfer katsayılarının düştüğü görülmüştür. Isı ve kütle transfer katsayılarının su debisi ile düzgün bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu katsayıların değişiminde su debisi değişiminin etkin olduğu görülmüş olup, literatürde de bu şekilde yorumlar yapılmıştır [6].



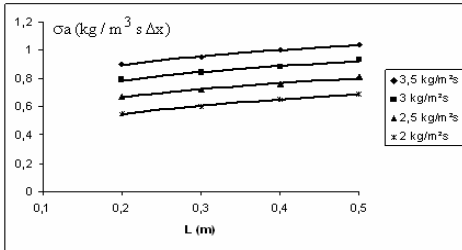
Şekil 7. 3,5 m/s hava hızında σ_a katsayısının, su akışı ve yükseklik ile değişimi (Variation of σ_a coefficient by water flux and height at 3,5 m/s air velocity)



Şekil 8. 3 m/s hava hızında σ_a katsayısının, su akışı ve yükseklik ile değişimi (Variation of σ_a coefficient by water flux and height at 3 m/s air velocity)



Şekil 9. 2,5 m/s hava hızında σ_a katsayısının, su akışı ve yükseklik ile değişimi (Variation of σ_a coefficient by water flux and height at 2,5 m/s air velocity)



Şekil 10. 2 m/s hava hızında σ_a katsayısının, su akışı ve yükseklik ile değişimi (Variation of σ_a coefficient by water flux and height at 2 m/s air velocity)

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (Conclusion)

Buharlaştırma soğutucularda serpantin ile su püskürtücüsü arasındaki bölgede, damlalar bir püskürtücüden belli bir hızla çıkmaktadır. Bu damlalar belli bir mesafeyi kat ederek, alttaki serpantin borularını ıslatmaktadır. Bu esnada ise ters yönde gelen hava akımı ile karşılaşmaktadır. Dolayısıyla su akışı açısından bu bölge su akışının başlangıç bölgesidir.

Deneysel verilerden sağlanan bulgular ışığında elde edilen katsayılar, bir istatistiksel analiz paket programı (SPSS) ile değerlendirilerek, regresyon

analizi yapılmıştır. Isı ve kütle transfer katsayıları ampirik bağıntılar halinde verilmiştir. Regresyon değeri, deneysel olarak elde edilen değerlerle, istatistiksel analiz sonucunda bulunan ampirik formülün sonuçlarının birbirine uygunluğunu ifade etmektedir. Regresyon değeri için olabilecek en iyi değer 1'dir. Ancak deneysel hatalar, yapılan bazı kabuller veya ihmaller neticesinde bu değer 1 çıkması beklenemez.

İlk olarak tüm deneysel değişkenlere bağlı olarak, düşük ve yüksek hava sıcaklığı değerleri için genel bir ısı transfer katsayısı ifadesi verilmiştir. Bu ifade;

$$\alpha_a = 2208 (u)^{0,630} (\dot{m}_s)^{0,309} (L)^{0,556}$$

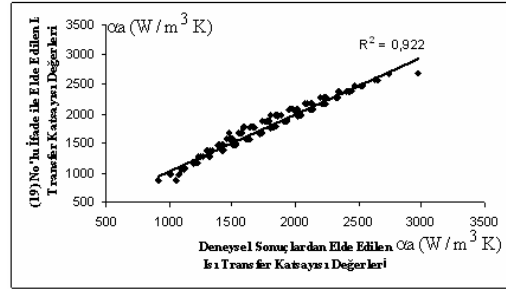
olarak elde edilmiştir. Bu ifadenin regresyon değeri $R^2 = 0,922$ olarak bulunmuştur. Bu uygunluk Şekil 11'de görülmektedir.

Yine tüm değişkenler için, düşük ve yüksek hava sıcaklığı değerlerinde genel bir kütle transfer katsayısı ifadesi elde edilmiştir. Bu ifade ise;

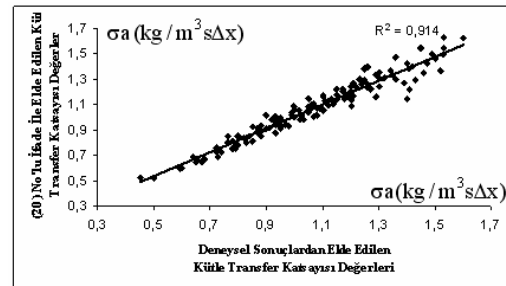
$$\sigma_a = 1,31 (u)^{0,693} (\dot{m}_s)^{0,408} (L)^{0,518}$$

şekindedir. Burada da regresyon değeri $R^2 = 0,914$ olarak bulunmuştur. Bu ifadenin deneysel veriler ile uyumu Şekil 12'de görülmektedir.

Genel denklemlerle birlikte, her yükseklikte, tüm hava hızı ve hava sıcaklığı değerleri için ayrı ayrı,



Şekil 11. (19) no'lu genel ısı transfer katsayısı denkleminin deneysel sonuçlar ile uyumu (Accordance of general heat transfer coefficient equation Nr 19 with experimental results)



Şekil 12. (20) no'lu genel kütle transfer katsayısı denkleminin deneysel sonuçlar ile uyumu (Accordance of general mass transfer coefficient equation Nr 20 with experimental results)

hacimsel ısı transferi ve kütle transferi katsayıları da aynı yöntemle bulunmuştur. Isı transfer katsayıları için verilen denklemler ve numaraları Tablo 1’de verilmiştir [7].

Aynı yaklaşımla, kütle transfer katsayıları ise Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 1. Çalışma yüksekliklerinde hava hızı ve su akısına bağlı ısı transfer katsayısı denklemleri (Table 1. Heat transfer equations depend on air velocity and water flux at operation heights)

Yükseklik (m)	İlişki ve Denklem Numarası
0,5	$\alpha a = 1581,25.(u)^{0,586} . (\dot{m}_s)^{0,291} \quad R^2 = 0,936 \quad (21)$
0,4	$\alpha a = 1330,45.(u)^{0,600} . (\dot{m}_s)^{0,291} \quad R^2 = 0,912 \quad (22)$
0,3	$\alpha a = 1101,54.(u)^{0,636} . (\dot{m}_s)^{0,316} \quad R^2 = 0,915 \quad (23)$
0,2	$\alpha a = 879.(u)^{0,699} . (\dot{m}_s)^{0,339} \quad R^2 = 0,932 \quad (24)$

Tablo 2. Çalışma yüksekliklerinde hava hız ve su akısına bağlı kütle transfer katsayısı denklemleri (Table 2. Mass transfer equations depend on air velocity and water flux at operation heights)

Yükseklik (m)	İlişki ve Denklem Numarası
0,5	$\sigma a = 1,09.(u)^{0,456} . (\dot{m}_s)^{0,314} \quad R^2 = 0,901 \quad (25)$
0,4	$\sigma a = 0,796.(u)^{0,671} . (\dot{m}_s)^{0,379} \quad R^2 = 0,932 \quad (26)$
0,3	$\sigma a = 1,56.(u)^{0,742} . (\dot{m}_s)^{0,383} \quad R^2 = 0,95 \quad (27)$
0,2	$\sigma a = 1,88.(u)^{0,557} . (\dot{m}_s)^{0,903} \quad R^2 = 0,93 \quad (28)$

Deneylerden elde edilen sonuçlar neticesinde, serpantin ile püskürtücü arasındaki mesafenin fazla olması ve bu çalışmada dikkate alınan bölgedeki ısı ve kütle transferinin dikkate alınmadan yapılan soğutma kulesi hesaplamalarının hatalı olacağı söylenebilir. Buharlaştırılmalı soğutuculardaki ısı transferi ve kütle transferi katsayıları için literatürde verilen ifadeler ile (19) ve (20) no’lu ifadeler birbirleri ile karşılaştırılırsa, (19) ve (20) nolu ifadeler ile elde edilen katsayıların oldukça düşük olduğu görülür. Bunun sebebi çalışma bölgesinde su ve havanın temas süresinin çok az olmasıdır. Ayrıca literatürdeki ısı transfer ve kütle transfer katsayılarının değişimine bakıldığında artan su akısı ile artış gösterdiği görülmektedir. Bu çalışma ile elde edilen katsayıların değişiminde de su debisi değişiminin etkin olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, bu bilgiler doğrultusunda buharlaştırılmalı soğutucularda, püskürtücü ile serpantin giriş açıklığı arasında, ısı ve kütle transferi için hacimsel ısı transfer ve kütle transfer katsayıları ampirik olarak elde edilmiştir. Literatürde bir buharlaştırılmalı soğutma sisteminin tamamı için hesaplamalar yapılmaktadır. Fakat bu yöntemler üç aşamada değerlendirilebilir. Bunlar serpantin alt bölgesi, serpantin bölgesi serpantin üst bölgesi için ayrı ayrı yapılacak hesaplamalardır. Bu yolla daha hassas sonuçlar elde edilir.

SEMBOLLER (LIST OF SYMBOLS)

A	: Buharlaştırılmalı soğutucu enine kesit alanı (m ²)
A	: 1 m ³ ’lük su hacmindeki ısı transfer yüzeyi (m ² /m ³)
c _b	: Doymuş buharın sabit basınçtaki özgül ısısı (kJ/kg K)
c _p	: Nemli havanın sabit basınçtaki özgül ısısı (kJ/kg K)
F	: Su ve hava arasında ısı ve kütle transferinin olduğu birim ara yüzey alanı (m ²)
h _h	: Nemli havanın entalpisi (kJ/kg)
h _{fg}	: Buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)
h _{fg,0}	: 0 °C’da suyun buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)
h _s	: Suyun entalpisi (kJ/kg)
L	: Su damlalarının düşme yüksekliği (m)
Le	: Lewis faktörü (Le = σ c _p / α _s)
\dot{m}	: Kütleli akı (kg/m ² s)
P _{atm}	: Atmosfer basıncı (Pa)
P _d	: Su buharı doyma basıncı (Pa)
T	: Sıcaklık (°C)
U	: Hız (m/s)
x	: Havanın özgül nemi (kg H ₂ O/kg hava)
αa	: Su ile hava arasındaki hacimsel ısı transfer katsayısı (W/m ³ K)
σa	: Su ile hava arasındaki hacimsel kütle transfer katsayısı (kg/m ³ sΔx)

Alt indisler (Subscripts)

B	: Buhar
ç	: Çıkış
d	: Doymuş
g	: Giriş
h	: Hava
s	: Su

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Webb, R.L., “A Unified Theoretical Treatment for Thermal Analysis of Cooling Towers, Evaporative Condensers and Fluid Coolers”, **ASHRAE Transactions**, No 90 (Part 2B), 398-415, 1984.
2. Kunduz, M., **Buharlaştırılmalı Kondansör Hesabı**, Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1986.

3. Peterson, D., Glasser, D., Williams, D. ve Ramsden, R., "Predicting the Performance of an Evaporative Condenser", **Transactions of ASME**, No 110, 748-753, 1988.
4. Stefanovic, V., Lakovic, S., Radojkovic, N. ve Ilic, G., "Experimental Study on Heat and Mass Transfer in Cooling Towers", **Facta Universitatis Mechanical Eng. Series**, No 1 (7), 849-861, 2000.
5. Stoecker, W.F., **İklimlendirme Esasları**, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Türkiye, 1992.
6. Ettouney, H.E., El-Dessouky, H.T., Bouhamra, W. ve Al-Azmi, B., "Performance of Evaporative Condensers", **Heat Transfer Engineering**, No: 22, 41-55, 2001.
7. Bayrakçı, H.C., **Buharlaştırılmalı Soğutucularda Serpantin ile Su Püskürtücüleri Arasındaki Bölgede Isı ve Kütle Transferinin Deneysel Olarak İncelenmesi**, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.