

# soğutma dünyası

• ENDÜSTRİYEL HAVALANDIRMA İKLİMLENDİRME SOĞUTMA KÜMESİ DERGİSİ • ISSN: 1304-1908 / Hakemli Dergi

## VP3000

### HVAC Sektörü için Yüksek Verimli AC Sürücü

- Fan, pompa, kompresör ve blower gibi uygulamalarda optimum motor kontrolü
- Dahili EMC ve harmonik filtre
- STO SIL3 güvenli duruş standardı
- 3C3 kart kaplama
- 50°C sıcaklığa kadar kayıpsız çalışma
- Dahili BACnet haberleşme ve yangın modu



**GÜREL**  
AUTOMATION

Gürel Otomasyon

Halkapınar Mah. 1490 SK. No:8/H Konak / İzmir

+90 232 203 62 31

gurelotomasyon.com

**DELTA**

# 108

OCAK-ŞUBAT-MART  
2025

Yeni  
sayımızı  
incelemek  
için  
okutunuz.



E. S. İ. A. D.  
1990

EGE SOĞUTMA SANAYİCİLERİ  
VE İŞ ADAMLARI DERNEĞİ

Yayın organıdır.  
Üç ayda bir yayımlanır.

# MAKALE

## DOLAYLI EVAPORATİF SOĞUTMA SİSTEMLERİNİN TEORİK VE VERİMLİLİK YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Analysis of Indirect Evaporative Cooling Systems  
in Terms of Theory and Efficiency

Sena Özlem ARICA

*Bu makale, 6-8 Eylül 2023 tarihinde gerçekleştirilen  
Uluslararası Katılımlı 24. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK'23)'nde sunulmuş ve bildiri kitabında yayınlanmıştır.*

### HAKEMLER\*

A. İbrahim ATILGAN, 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.  
Fırat ÖZDEMİR, Dr. Öğretim Üyesi  
Fikret PAZIR, Prof. Dr.  
Hüsametdin BULUT, Prof. Dr.  
Hüseyin BULGURCU, Doç. Dr.  
İlhan Tekin ÖZTÜRK, Prof. Dr.

İsmail KARAÇALI, Prof. Dr.  
Kadir İSA, Dr.  
M. Barış ÖZERDEM, Prof. Dr.  
M. Turhan ÇOBAN, Prof. 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.  
Özay AKDEMİR, Dr. Öğr. Üyesi.  
Özgür SOLMAZ, Dr. Öğr. Üyesi

Ramazan KÖSE, Prof. Dr.  
Rasim KARABACAK, Prof. Dr.  
Recep YAMANKARADENİZ, Prof. Dr.  
Selami KESLER, Prof. Dr.  
Serhan KÜÇÜKA, Prof. Dr.  
Tuncay YILMAZ, Prof. Dr.  
Turan ERKAN  
Utku ŞENTÜRK, Doç. Dr.  
Y. Onur DEVRES, Prof. Dr.  
Yunus ÇERÇİ, Prof. Dr.

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



HAKEMLİ MAKALE ARŞİVİMİZE  
ULAŞMAK İÇİN OKUTUNUZ.

BİLİMSEL MAKALE ARŞİVİMİZE  
ULAŞMAK İÇİN OKUTUNUZ.



**ÖZET**

Bu çalışmada farklı tipte dolaylı evaporatif soğutma sistemlerinin verimliliği ve COP değerleri araştırılmıştır. Makale, dolaylı evaporatif soğutma ile ilgili teori, çalışma prensipleri ve çeşitli tipteki dolaylı evaporatif soğutma cihazlarının verimlilik ve COP değerlerini içermektedir. Bu soğutma teknolojisi, dolaylı evaporatif soğutma ekipmanı ve teknolojisi ticari, endüstriyel, konut gibi farklı iklimlendirme uygulamalarında uygundur. Dolaylı evaporatif soğutma teknolojisi tamamen çevre dostudur ve çok düşük küresel ısınma etkisine sahiptir. Dolaylı evaporatif soğutma teknolojisinin tek dezavantajı su tüketimidir.

*Anahtar kelimeler: Dolaylı evaporatif soğutma sistemleri, soğutma, verimlilik, COP.*

**ABSTRACT**

In this study different indirect evaporative cooling systems' efficiency and COP value are investigated. The review is presenting in details: theory, working principles and the efficiency and COP of different type of evaporative cooling systems. The indirect evaporative cooling equipment and technology is suitable in different air conditioning applications: commercial, industrial or residential. The indirect evaporative cooling technology is completely environmental friendly and has very low global warming impact. The single disadvantage of indirect evaporative cooling is the water consumption.

*Keywords: Indirect evaporative cooling systems, cooling, efficiency, COP.*

**1. LİTERATÜRDE EVAPORATİF SOĞUTMA**

Dolaylı evaporatif soğutucuların ısı modellemesi 1980'lerde Maclainecross ve Banks [1] tarafından başlatılmış ve bunu birçok benzer çalışmalar takip etmiştir. Modeller farklı akış yöntemleriyle (çapraz akış, ters akış vb.) Maclainecross ve Banks, Erens ve Dreyer [2], Zhao ve ark.[3] tarafından denenmiştir. Dolaylı evaporatif soğutucuların ısı performansını etkileyen fiziksel faktörler (kanal uzunluğu, kanal yüksekliği ve hava debisi) test edilmiştir [3].

Bilge ve Bilge'nin çalışmalarında havanın, dolaylı ve doğrudan olmak üzere iki aşamada evaporatif olarak soğutulduğu bir sistem tanıtılmıştır. İklimlendirme

sistemlerinde kullanılan klasik soğutma sistemleri ile bu sistem enerji tüketimleri açısından karşılaştırılmış ve uygun dış hava koşullarında dolaylı/doğrudan evaporatif soğutma sisteminin çok daha ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır. Sistemin duyulur ısı yükünün 150 kW olduğu koşullarda, klasik soğutma sisteminin COP değeri 3,5 iken bu sistemin COP değerinin 15,78 olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu sistemin %100 taze hava ile çalışması ve ilk yatırım maliyetinin çok düşük olması nedeniyle projeci firmaların ve ilgili imalatçı firmaların gündeminde kalması gerektiği vurgulanmıştır [4].

Dolaylı çapraz akışlı evaporatif soğutma sistemi Antonellis ve ark. [5] tarafından test edilmiştir. Sistem minimum su harcayacak şekilde tasarlanmış olup, püskürtülen su debisi, ikincil hava debisinin %0,4 ile %4'ü olacak şekilde ayarlanmıştır. Çalışmalarda farklı çalışma koşullarını kapsayan toplamda 112 deney yapılmıştır. Püskürtülen su debisi, nemlendirme nozullarının yeri, ikincil hava sıcaklığı, su püskürtme miktarı, nemlilik ve akış oranının etkileri detaylıca incelenmiştir. Sonuç olarak, verimin nozul sayısından ve genişliğinden az, ancak püskürtülen suyun debisinden önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca nozulların havaya karşı karşılıklı bir şekilde yerleştirildiklerinde paralel şekilde yerleştirmeye göre verimi arttırdığı gözlemlenmiş olup, yaş termometre veriminin %50 ile %85 arasında arttığı gözlemlenmiştir.

Dolaylı evaporatif soğutma sisteminin verimi Liberati ve ark. [6] tarafından değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda ısı değiştiricisine püskürtülen suyun çok düşük akış oranlarında bile sistemin soğutma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.

Hasan tarafından buharlı sıkıştırma olmadan, dolaylı evaporatif soğutma ile havanın yaş termometre sıcaklığının altında olmasını sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Asıl amaç, dolaylı olarak ön soğutmadan geçen havanın son olarak soğutulup dağıtılmadan önce soğutucuya yönlendirilmesidir. Çalışmada ısı ve kütle transferi için bir model geliştirilmiş olup, 4 soğutucu tip incelenmiştir. Bunlar; üç tane iki aşama soğutucu (ters akış, paralel akış ve kombine paralel-rejeneratif akış) ve tek aşama ters akış rejeneratif soğutucudur. Dolaylı evaporatif soğutucu kullanımı ile beklenen sonuç, soğuyan havayı ortam yaş termometre sıcaklığından daha düşük sıcaklıklara düşürebilmektir. Böyle bir sistem için son sıcaklık ortam havasının çığ nokta sıcaklığıdır. Sistemin verimi, iki aşamalı ters akış için 1,26,



paralel akış için 1,09 ve kombine paralel rejeneratif soğutucu için 1,31'dir. Tek aşama ters akış rejeneratif soğutucu için ise verim 1,16 bulunmuştur [7].

Küçük ve büyük cezaevi tesisleri, iklimlendirme sistemleri, merkezi soğutma ve doğrudan/dolaylı evaporatif soğutma sistemleri güvenilirlik ve verimlilik yönünden deneysel açıdan Al Malaki tarafından incelenmiştir. Bu çalışmanın sonunda iki kademeli soğutucu sistemin gerekli enerji tüketimini yıllık toplamda yaklaşık %40 oranında azaltmaya katkıda bulunduğu gözlemlenmiş olup, aylık enerji tüketim maliyetinin ise her hapisane için düşük sıcaklıklardaki mevsimlerde yaklaşık 25 ABD doları ve yüksek sıcaklıktaki mevsimlerde ise yaklaşık 43 ABD doları olarak daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca taze hava sağlaması bakımından diğer sistemlere göre 3 kat daha fazla hava sağladığından ötürü hapisane salonlarında doğru havalandırma sağlamak için büyük bir avantaj sağlamaktadır [8].

%100 taze hava ile çalışan doğrudan/dolaylı evaporatif soğutma sisteminin enerji performansı Kim ve Jeong tarafından değerlendirilmiştir. Pilot bir kampüs binası seçilerek değişken hava debili sistem esas alınarak, mevsim durumuna göre tek aşamalı ve iki aşamalı evaporatif soğutma durumları için ölçüm yapılmıştır. Doğrudan ve dolaylı evaporatif soğutucuların verimliliği, ölçüm noktalarındaki hava sıcaklığı ve nemin ölçülmesiyle bulunmuştur. Sonuç olarak iki aşamalı doğrudan/dolaylı evaporatif soğutucunun enerjiden %51 tasarruf sağladığı görülmekle birlikte bu sistemin, sıcak ve nemli iklimde ise değişken hava debili sisteme göre %36 daha fazla enerji harcayabileceği belirtilmiştir [9].

El-Dessouky ve ark. çalışmalarında, iki aşamalı evaporatif soğutucu ünitesini Kuveyt hava koşullarında test etmişlerdir. Sistemde dolaylı evaporatif soğutmayı takiben doğrudan evaporatif soğutma yöntemini uygulamışlardır. Sistemi Kuveyt'teki kuru termometre sıcaklığının yazın 45°C'den fazla olduğu durumlar için incelemişlerdir. Sonuçlar dolaylı/doğrudan evaporatif soğutma sistem veriminin %90-120 arasında değiştiğini göstermiştir. Benzer şekilde dolaylı evaporatif soğutma sistem verimi (COP) %20-40 arasında değişirken, doğrudan evaporatif soğutma sistem verimi (COP) %63-93 arasında değişmektedir. Bu verileri dolaylı evaporatif soğutucunun dışındaki Nusselt sayısının doğrulanması için kullanmışlardır. Sonuçlar Nusselt sayısının 150-450 arasında değiştiğini göstermekte olup bu

sayı ısı transfer katsayısının 0,1-0,4 kW/m<sup>2</sup>K arasında değiştiğini göstermektedir. Sonuç olarak evaporatif soğutma sisteminin iç ortam iklimlendirme sistemi için verimli sonuçlar çıkarttığını gözlemlenmiştir [10].

Evaporatif soğutma modellerindeki ekserji verimliliğini ve tersinmezliği göstermek için ekserji analizi Farmahini-Farahini ve ark. tarafından yapılmıştır. Ekserji analizinde İran'ın 6 farklı şehrindeki; doğrudan, dolaylı ve iki aşamalı dolaylı/doğrudan evaporatif soğutma sistemlerinin deneysel sonuçları temel alınmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda ise, doğrudan evaporatif soğutma sisteminin en iyi ara ve kuru iklimde çalıştığı ve ekserji verimliliğinin %20 olduğu gözlemlenmiş olup dolaylı evaporatif soğutma sisteminin ise en iyi sıcak ve kuru iklimde çalıştığı ve ekserji verimliliğinin ise %55 olduğu gözlemlenmiştir. Dolaylı/doğrudan iki aşamalı evaporatif soğutma sistemlerinin ekserji verimliliğinin ise sıcak ve yarı nemli iklimde %62'ye ulaştığı gözlemlenmiştir [11].

Arıca çalışmasında; dolaylı evaporatif soğutma sistemi kullanılarak bir mekanın soğutulmasını sağlayan bir sistem geliştirip, analizini yapmıştır. Dış ortamdaki fan ile üflenen taze ve sıcak hava, iç ortamdaki fan yardımıyla emilen serin iç hava ile belli oranlarda karıştırılarak, özgün olarak tasarımı yapılmış olan dönel çarkın dışına üflenmektedir. İç ortamdaki gelen iç ortam havası dönel çarkın içine girmeden önce nemlendiriciler vasıtasıyla nemlendirilerek doğrudan evaporatif soğutma vasıtasıyla nemlendirilerek soğutulmaktadır. Dolayısıyla dönel çark; içinden geçen iç ortam havası ile dışarıdan geçen taze hava arasında bir ısı değiştiricisi görevi görerek iki havanın karışmadan aralarında ısı transferi gerçekleşmesini sağlar. Dönel çarkın dışından soğuyarak geçen karışım havası, çapraz akışlı havadan havaya ısı değiştiricisine girerek, ikinci kez nemlendirilerek soğuyan iç ortam havası ile tekrar soğuması sağlanır. Bu sayede odanın konfor koşullarına gelmesi sağlanır. Yapılan deneyler sonucunda; en yüksek COP değerinin %20 taze hava, %80 iç ortam havası karışımı yapılması durumunda elde edilebileceği gözlemlenmiş olup, 2,72 değerine ulaşılmıştır. Ulaşılan COP değeri teorik olarak hesaplanan değerden düşük olsa da sızdırmazlık ve yalıtım tam anlamıyla sağlanabilirse COP değerinin çok daha yüksek olacağı açıktır [12].

Qilong Liu ve ark tarafından çapraz akış plakalı dolaylı evaporatif soğutma deney sistemi kurulmuş ve deneysel veriler uygulanarak mevcut değerlendirme indekslerinin uyumsuzluğu analiz edilmiştir. Yeni bir



entalpi verimliliği adı verilen indeks makalelerinde tanıtılmıştır. Entalpi değişim eğrisinin verimliliği, toplam ısı transferininkiyle oldukça uyumludur. Diğer literatürlerdeki verilerden yararlanılarak, entalpi veriminin çapraz akışlı ısı değiştirici ısı transfer kapasitesini değerlendirmek için kullanılabilir. Değerlendirme endeksi termal hesaplamalar için kullanılabilir. Dolaylı evaporatif soğutucu, taze havayı önceden soğutmak için kombine iklimlendirme sisteminin bir cihazı olarak birincil hava kanallarında yoğunlaşmaya neden olabilecek sıcak ve nemli bölgelerde uygulanır. Bu durum için trend ısı değişim verimliliğini ifade etmek için kullanılan mevcut değerlendirme indeksleri, toplam ısı transferi gibi kıstaslar kullanılır. [13].

İklimlendirme sistemleri, ortamdaki konforu koruyarak iş verimliliğini artırmış ve yaşam tarzını iyileştirmiştir. Artan iklimlendirme talebi, enerji ve çevre üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. 2015 yılında iklimlendirme sistemi, üretilen toplam küresel elektriğin %6'sını tüketmiş ve 2050 yılına kadar bu oranın %20'ye çıkması beklenmektedir. Sürdürülebilir soğutma hedeflerine ulaşmak için nem alma süreçleriyle birleştirilebilen, duyulur soğutma için geliştirilmiş bir dolaylı evaporatif soğutucu sistemi önerilmiştir. 800 mm üzerinde uzunluk ve 280 mm genişliğindeki evaporatif soğutma pedi, küçük sıcaklıklarla 10°C'ye kadar sıcaklık farkı olabildiğini göstermiştir. Önerilen dikey ısı değiştiricisi, dolaylı evaporatif soğutucunun en iyi konfigürasyonudur. [14].

Qiu [15] tarafından laboratuvar tabanlı bir çalışma gerçekleştirilmiş olup, küçük ölçekli bir dolaylı evaporatif soğutma prototipi ile bir test sistemi geliştirilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre dolaylı evaporatif soğutma ünitesinin gerçek performansının daha önce elde edilen değerlerden çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Performanstaki düşüşün nedeninin, ünitenin zayıf su dağıtımından olduğu belirlenmiştir. Bu da plaka yüzeyinin 1/2 ile 2/3'üne denk gelmektedir. Bu problem bir su püskürtme cihazı kurularak ve güneş enerjisiyle çalışan bir PV paneli ile entegre edilerek çözülmüştür. Fanlar ve pompanın çalışması için gerekli olan elektrik enerjisi sağlanmıştır. Yapılan değişikliklerden sonra yeniden test yapılmış ve sonuçlar yeni ünitenin soğutma kapasitesinin ve COP değerinin eskisinden 3 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir. Birincil havanın sıcaklık düşüşü ünitenin giriş ve çıkışı arasında 3-8°C aralığında olduğu gözlemlenmiştir [15].

Tulsidasani ve ark. [16] tarafından dolaylı evaporatif soğutma cihazının performans katsayısı (COP) ve her ikisini de kullanan birincil ve ikincil hava hızları modelleme ve test yöntemleri incelenmiştir. Teorik olarak tahmin edilen ve deneysel olarak test edilen arasında Hindistan'ın Indore şehri için geliştirilen bir dolaylı evaporatif soğutma için COP'ler bulunmuştur. Dolaylı evaporatif soğutma ünitesinin maksimum COP'sinin birincil hava ünitesi için 22 olduğu belirlenmiştir. Birincil hava hızı 3,5 m/s hız ve ikincil hava hızı 3 m/s olması durumlarında birincil hava ünitesi için 10°C'ye kadar birincil hava sıcaklığı düşüşü gerçekleşmiştir [16].

Jain [17] tarafından, iki aşamalı düz plakalı ısı değiştiricisinden oluşan evaporatif soğutucunun etkinliği ve iç hava gereksinimi, yüksek nemli ve düşük sıcaklıktaki evaporatif soğutma odasında test edilmiştir. Bu soğutucunun performansı sıcaklık açısından değerlendirilmiştir. Isı değiştiricisinin verimliliği ve iki kademeli evaporatif soğutucunun soğutma etkinliği araştırılmıştır. İki kademeli soğutucudaki sıcaklık düşüşü, 8°C ile 16°C arasında yaş termometre sıcaklığına yakın soğuk hava sağlayabilir. Ortam havasının sıcaklığı ve %90 bağıl nem olması durumunda tekli evaporatif soğutucunun yaş termometre etkinliği 0.85-0.9 iken, soğutma etkinliği 1.1-1.2'dir [17].

Velasco Go'mez ve ark. [18] gerçekleştirilen iki çalışma modu altında bir polikarbonattan yapılmış dolaylı evaporatif soğutma ünitesine yönelik bir deney çalışması yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, iklim odasından çıkan egzoz havası ısı eşanjörünün ikincil havası olarak ve dış ortam havası birincil hava olarak kullanılmıştır. Diğer koşullar aynı kaldığında, egzoz çıkış havasına bir su püskürtme önlemi eklenmiştir. Deneysel sonuçlar neticesinde, dolaylı evaporatif soğutma prototipinin daha yüksek soğutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, daha yüksek dış hava sıcaklığı veya hava akış hızı sayesinde daha gelişmiş bir soğutma performansı elde edilmiştir [18].

Jiang ve Xie [19] tarafından soğutma sağlamada kullanım için yeni bir dolaylı evaporatif soğutucu HVAC sistemi geliştirilmiştir. Test sonuçları çıkış suyu sıcaklığının yaklaşık 14-20°C civarında giriş havası yaş termometre sıcaklığından daha düşük olduğunu ve çiy noktası sıcaklığından daha fazla olduğunu göstermiştir. Chiller'in COP'si 0,4-0,8 aralığındadır [19].



Costelloe ve Finn [20] tarafından bir evaporatif soğutma cihazını analiz etme yöntemi olarak son deneysel bulgular ve meteorolojik referans hava yılı verileri kullanılmıştır. Ayrıca deneysel olarak operasyonel değişkenlerden (örn. ortam yaş termometre sıcaklığı, soğutma kule hava akış hızı, birincil ve ikincil su akış hızı) açık bir sistem içeren bir test sisteminin soğutma etkinliği, soğutma kulesi ve plakalı ısı eşanjörünün soğutma kulesi hava akış hızı ve ikincil su akış hızının sistemin soğutma etkinliğine güçlü etki yaptığı bulunmuştur. Bu sonuç, enerji verimli bir kontrol stratejisi elde edilmesine yardımcı olmuştur [20].

Duan ve ark. [21] tarafından dolaylı evaporatif soğutma teknolojisine ilişkin incelemeye dayalı bir çalışma bildirilmiştir. Arka plan, tarih, mevcut durum, konsept, standardizasyon, sistem konfigürasyonu, operasyonel mod, araştırma ve sanayileşme, pazar beklenti ve engellerin yanı sıra gelecek, AR-GE ve ticarileştirmeye odaklanmaktadır. Bu inceleme çalışmasında, dolaylı evaporatif soğutma teknolojisinin geleneksel mekanik buharlı soğutma sistemlerine bir alternatif olma potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir [21].

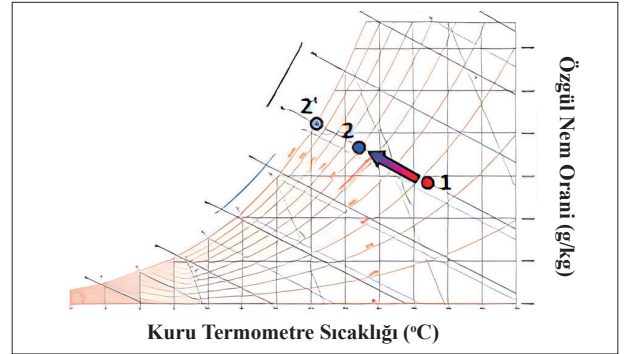
Evaporatif soğutma sistemleri; doğrudan ve dolaylı evaporatif soğutma sistemleri olarak iki ayrı kısımda incelenmektedir. Doğrudan evaporatif soğutma sisteminde kuru hava, cihaz içerisindeki fan yardımı ile dışarıdan emilir. Emilen kuru hava, yüzeyi devir daim pompası ile ıslak tutulan evaporatif pedlerden soğutulmuş olarak gönderilir.

Doğrudan evaporatif soğutmada farklı olarak dolaylı evaporatif soğutmada birincil ve ikincil hava olmak üzere iki değişik hava tipinden söz edilir. Birincil hava adı verilen taze hava (üfleme havası) dolaylı evaporatif soğutmada sisteme dış ortamdan giriş yapar ve ikincil hava olarak bilinen ve doğrudan ünitelerde buharlaştırılarak soğutulan başka bir hava akımı tarafından, bir ısı değiştiricisi vasıtasıyla, bünyesine hiç nem katılmaksızın duyulur bir şekilde soğutulur.

## 2.DOĞRUDAN EVAPORATİF SOĞUTMA

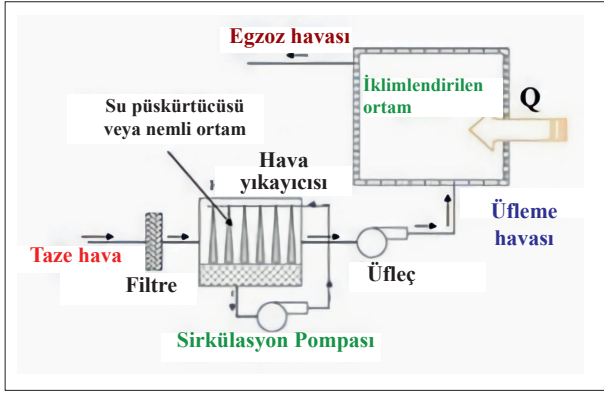
Doğrudan evaporatif soğutma sisteminde kuru hava, cihaz içerisindeki fan yardımı ile dışarıdan emilir. Emilen kuru hava, yüzeyi devir daim pompası ile ıslak tutulan evaporatif pedlerden soğutulmuş olarak gönderilir.

Doğrudan evaporatif soğutma sisteminin çalışma süreci Şekil 1'deki tabloda sunulmuştur [22]. Gizli değerine karşılık gelen suyun bir kısmı buharlaşarak akan havaya difüzyon yoluyla geçer ve bu havanın nem içeriği artar. Bu çıkış havasının (2) sıcaklığı, hava tarafından aktarılan ısı nedeniyle azalır, bu yüzden çıkış havasının entalpisi azalır. Çıkış havasının entalpisi, nem alarak havaya geri kazanılan gizli ısının etkisiyle giriş havasının entalpisi ile aynı olacaktır.



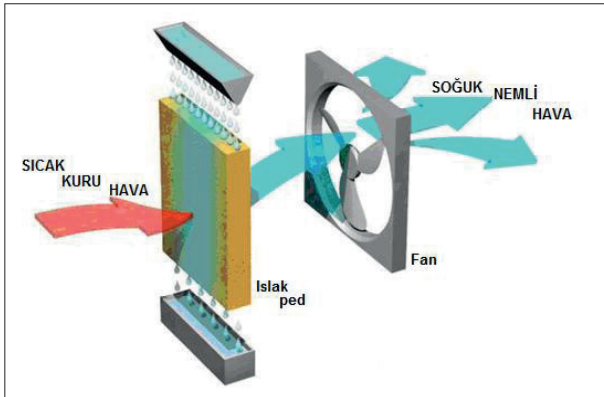
Şekil 1. Doğrudan evaporatif soğutma sisteminin diyagramda gösterimi [22]

Kümes ve sera gibi kapalı tarımsal üretim yapıları için evaporatif soğutma grubunda yer alan fan/pedli serinletme sistemleri önerilmektedir. Yapının çatı veya duvarları üzerine bu sistemde yer alan poröz yapılı pedler yerleştirilir. Üst taraflarındaki delikli borularla damlatılan su ile pedler sürekli ıslak tutulur. Pedler, belirli açılarla konumlandırılmış memelerden su püskürtülerek de bazen ıslatılabilir. Yapının kısa duvarlarına ya da ona bitişik uzun duvarlar üzerine sistemin diğer elemanı olan fanlar yerleştirilir. Yapı içerisindeki hava, fanlarla (aspiratörler ile) dış ortama atılırken, iç ortamda oluşan düşük basıncın etkisiyle sıcak dış ortam havası pedlerden geçerek yapı içerisine girer. ıslak ped yüzeylerinden bir miktar suyu da buharlaştırarak bu geçiş sırasında yapı içerisine girer. Havanın duyulur ısı, bu buharlaşmaya bağlı olarak gizli ısıya dönüşür ve hava soğumuş olarak yapı içerisine alınır. Evaporatif soğutma sistemlerinin performansı buharlaştırılan su miktarına bağlıdır. Sistemin performansı; buharlaştırılan su miktarı arttıkça, daha fazla sıcaklık düşmesi sağlanacağından o düzeyde artar. Bu da, soğutulmaya çalışılan havanın bağıl nem düzeyine bağlıdır. Sistemin performansı da havanın bağıl nem düzeyi azaldıkça daha fazla suyun buharlaştırılmasına olanak yaratılacağı için o düzeyde artacaktır [23].



Şekil 2. Doğrudan evaporatif sistemi [24]

Şekil 2'de doğrudan evaporatif soğutma sisteminin şeması görülmektedir.



Şekil 3. Pedli evaporatif soğutma [25]

Şekil 3'te ise pedli evaporatif soğutma sisteminin şeması görülmektedir.

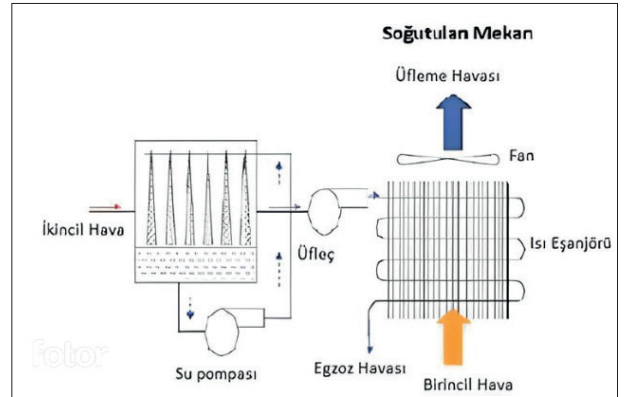
### 3.DOLAYLI EVAPORATİF SOĞUTMA SİSTEMİ

Doğrudan evaporatif soğutmada farklı olarak dolaylı evaporatif soğutmada birincil ve ikincil hava olmak üzere iki değişik hava tipinden söz edilir. Birincil hava adı verilen taze hava (üfleme havası) dolaylı evaporatif soğutmada sisteme dış ortamdan giriş yapar ve ikincil hava olarak bilinen ve doğrudan üniteye buharlaştırılarak soğutulan başka bir hava akımı tarafından, bir ısı değiştiricisi vasıtasıyla, bünyesine hiç nem katılmaksızın duyulur bir şekilde soğutulur. Doğrudan evaporatif sistemlerde olduğu gibi birincil havanın kuru termometre sıcaklığında yine düşüş gözlenir. Fakat bir doğrudan evaporatif soğutucudaki kuru termometre sıcaklığındaki düşüş, aynı şartlar altındaki dolaylı evaporatif soğutucuya göre daha fazladır.

Birincil havanın yaş termometre sıcaklığındaki düşme dolaylı evaporatif soğutma işlemindeki doğrudan evaporatif soğutma işleminden farklı olarak gözlenir. Yaş termometre sıcaklığı (ikincil havanın) ise sabit kalır. İkincil hava, ya mahalden dönen ikincil hava olarak kullanılır, ya da dış ortamdan alınır.

Dolaylı evaporatif soğutma işlemi, buradan anlaşılacağı üzere doğrudan evaporatif soğutma işleminden iki temel farkla ayrılır. Birincisi, doğrudan evaporatif soğutma işleminde taze havaya nem katılmaması sonucu taze havanın özgül nem değeri sabit kalır, doğrudan evaporatif soğutma işleminde ise sisteme giren taze havaya nem katılmasından dolayı taze havanın özgül nem değerinin artış göstermesidir.

Bu sebepten, nem oranının belirli bir seviyede kalmasının istendiği uygulamalarda dolaylı evaporatif soğutucu sıklıkla kullanılır. Dolaylı evaporatif soğutma işleminde iklimlendirilecek mahale servis edilen üfleme havasının hem kuru termometre sıcaklığının hem de yaş termometre sıcaklığının düşmesi ikinci farktır [24].



Şekil 4. Dolaylı evaporatif soğutma sistemi [24]

#### 3.1.Geleneksel Dolaylı Evaporatif Soğutma Sistemleri

Dolaylı evaporatif soğutma sistemleri; havanın sıcaklığını havanın nemini arttırmadan azaltabilir. Havaya nem ekmeden sıcaklığının düşmesi dolaylı evaporatif soğutma sistemlerini, doğrudan olanlara göre daha kullanılabilir bir hale getirmektedir. Bir dolaylı evaporatif soğutma sisteminde, birincil (ürün) hava plakanın kuru tarafından geçer ve ikincil (çalışma) havası plakanın karşı ıslak yüzeyinden geçer. ıslak taraftaki hava ısıyı emer. ıslak yüzeydeki su, buharlaşmanın yardımıyla kuru taraftaki havayı soğutur iken buharlaşan suyun gizli ısıyı ıslak tarafta çalışma ortamına iletir.

Dolaylı evaporatif soğutma sisteminde çıkış havasının sıcaklığı sonsuz bir yüzey alanı boyunca, plakanın kuru tarafında, yaş termometre sıcaklığına ulaşacaktır. Buna rağmen, gelen havanın sadece %40-80'i etki olarak nemlenir [30]. Soğutma verimliliğine etki eden nedenler arasında;

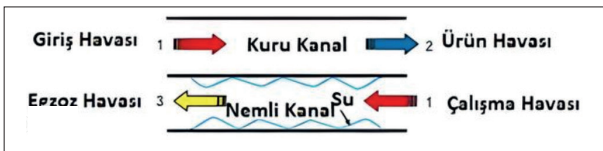
1. Sınırlı bir ısı değişim alanı,
2. Tamamiyle çapraz akışlı bir sistem oluşturulamaması,
3. Hiçbir saf karşı akış modeli olmaması
4. Plakada tek tip ve eşit su dağılımını sağlamanın zor olması.

Şekil 6, bir dolaylı evaporatif soğutma sisteminin çalışma prensibini ve psikrometrik diyagramı göstermektedir. Dolaylı bir evaporatif soğutma sistemi çalışması sırasında, birincil hava (ürün havası, kuru hava) kanala girerken ikincil (çalışma) hava bitişik ıslak kanala girer. Birincil hava, ikincil hava arasındaki hissedilir ısı transferi ile soğutulur. Sonuç olarak, birincil hava sabit sıcaklıkta soğur.

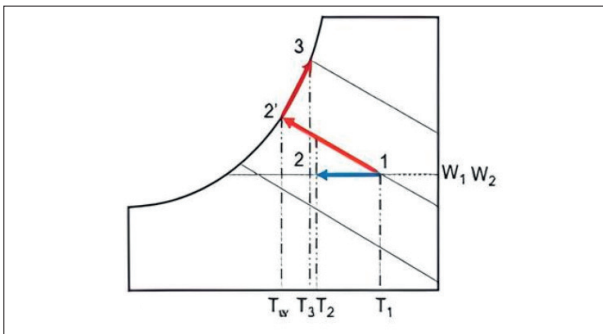
Durum 2 ve teorik olarak konuşulursa, havanın entalpi düşüşü kuru yan kanal içindeki entalpi artışına eşittir. Islak yan kanal içindeki hava;

$$h_1 - h_2 = h_3 - h_1$$

### 3.2. M-Çevrim Dolaylı Evaporatif Soğutma Sistemi



Şekil 5. Kanal içinde dolaylı evaporatif soğutma sisteminin gösterimi [21]



Şekil 6. Dolaylı evaporatif soğutma sisteminin psikrometrik diyagramda gösterimi [21]

Dolaylı evaporatif soğutmada, ısı eşanjörünün soğutma performansını artırmak için bir M-döngüsü [26,27,28] olarak bilinen yeni termodinamik çevrim, Prof. Valeriy Maisotenko tarafından ekstra miktarda enerjiden yararlanmayı sağladığı iddia edilmiştir.

Özel bir düz plaka, çapraz akışlı ısı değiştiricisi kullanılarak ısıyı uzaklaştırır. Çalışma sırasında, havanın tamamı başlangıçta kuru ortama getirilir. Isı değiştiricisinin kanalları hareket ederken soğutulur. Belirlenen sıcaklık farkı nedeniyle akış yolu ısı değiştirici plakalarının kuru ve ıslak tarafı arasından geçerken delikli delikler boyunca, havanın bir kısmı, çalışma (veya ikincil) hava, bitişik ıslak kanallara yönlendirilir. Islak kanallardan kuru kanala normal yönde hareket eden hava, doymuş ıslak yüzeyden buharlaşan suyu alarak plaka boyunca ısının azalmasını sağlar.

Sonuç olarak, çalışan (ikincil) hava kademeli olarak doyurulur ve akış yolları boyunca hareket ederken ısıtılır ve son olarak ortama boşaltılarak durum değişikliğine neden olur. Bu arada kuru kanalda kalan hava ileriye doğru hareket eder ve akış yolunun sonunda soğutulurak görece yüksek sıcaklığa kadar soğutulur. Geleneksel dolaylı evaporatif soğutma ısı değiştiricisi, M çevrimli ısı değiştiricisi oda boşluğuna iletilmek üzere çok daha soğuk bir hava akımı üretir, böylece artan soğutma çıktısını üretir. İçindeki potansiyeli nedeniyle ürün havasının çiy noktasına ulaşan yaklaşım da "çiy noktası (M-döngüsü) soğutması" olarak bilinir. M-çevrim bazlı ısı değiştiricisinden, yaş termometre verimi elde edilebilir. %81-91 ve %50-60 çiy noktası etkinliği için [29], geleneksel dolaylı evaporatif soğutma sistemi ısı değiştiricisinden %10-30 daha yüksek verimlilik elde edilebilir.

M-döngüsü çapraz akışlı ısı değiştiricisi ile çalışmış olsa da soğutma etkinliğinde belirgin bir artış görülmektedir. Geleneksel dolaylı evaporatif soğutma sisteminde ısı değiştiricisi ile ilgili çeşitli sınırlamalar getirilmiştir: (1) Çalışma havası yüksek derecede tam olarak soğutulmamıştır. Kademeli olarak bitişik ıslak suya yönlendirilir. Akış yolunda kanallar ve (2) yapı oluşturulur.



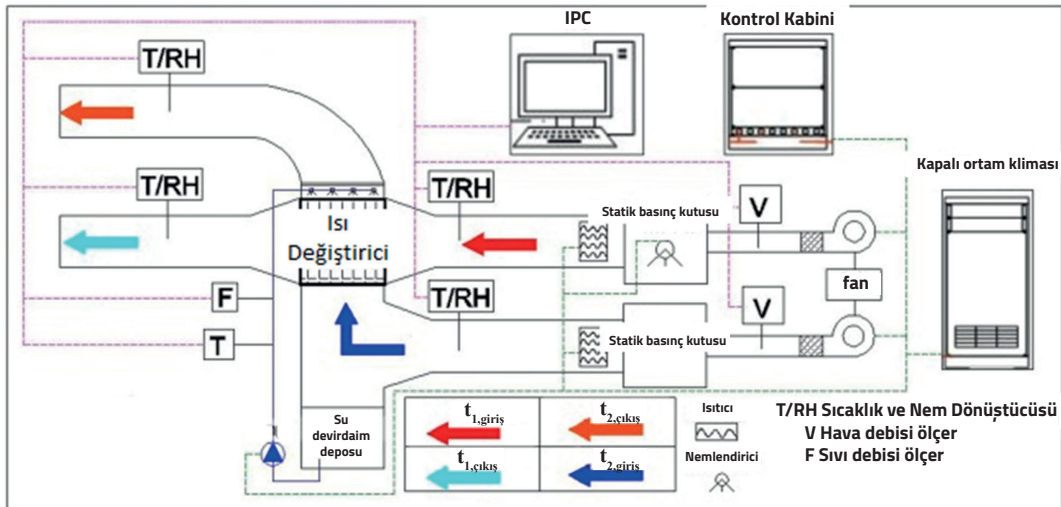
Tablo 1. Farklı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar [21]

Test No	Test Yöntemi	Durum	İşletim Şartı	Model Karşılaştırması
1	Harcanan Güç, Statik Basınç, Hava Kuru Termometre Sıcaklığı, Bağıl Nem, Hava Hızı	Tüp Tipi (Dolaylı Evaporatif Soğutma)	$t_{p,dbin} = 41 - 45^{\circ}C$ $U_p = 3 - 8 \text{ m/s}$ $U_s = 3 - 8 \text{ m/s}$	Evet
2		M-Çevrim Dolaylı Evaporatif Soğutma	$t_{p,dbin} = 26,7 - 43,8^{\circ}C$ $t_{p,wbin} = 18,1 - 23,9^{\circ}C$ $u_p = 0,53 - 1,38 \text{ m}^3/\text{s}$	Hayır
3		M-Çevrim Çapraz Akış Dolaylı Evaporatif Soğutma	$t_{p,dbin} = 24 - 45^{\circ}C$ $w_{p,in} = 6,9 - 26,4 \text{ g/kg}$ $u_p = 2,4 \text{ m/s}$ $m_s/m_p = 0,33$	Evet
4		M-Çevrim Çapraz Akış Dolaylı Evaporatif Soğutma	$t_{p,dbin} = 25 - 40^{\circ}C$ $RH_{p,in} = 50\%$ $V_p = 0,036 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_s = 0,833 \text{ m}^3/\text{s}$ $t_{p,dbin} = 25 - 40^{\circ}C$ $RH_{p,in} = 50\%$ $V_p = 0,036 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_s = 0,833 \text{ m}^3/\text{s}$	Evet
5		Çapraz akış tip dolaylı evaporatif soğutma	$t_{p,dbin} = 39 - 43^{\circ}C$ $RH_{p,in} = 37 - 46\%$ $V_p = 0,065 - 0,843 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_s = 0,833 \text{ m}^3/\text{s}$	Hayır



Tablo 1. Farklı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar [21]

Test No	Test Yöntemi	Durum	İşletim Şartı	Model Karşılaştırması
6		Dolaylı evaporatif soğutma (M-çevrim)DX	$t_{p,dbin} = 28,4-32^{\circ}C$ $RH_{p,in} = 38 - 87\%$ $V_p = 1,58 - 1,69 m^3/s$ $V_s = 0,67 - 0,77 m^3/s$ $\frac{m_s}{m_p} = 0,42 - 0,62$	Hayır
7		Kurutucu /Dolaylı Evaporatif Soğutma (Çapraz Akış Tip)	$t_{p,dbin} = 28,3^{\circ}C$ $RH_{p,in} = 60\%$ $V_p = 0,35 m^3/s$ $V_s = 0,35 m^3/s$	Hayır
8		Dolaylı Evaporatif Soğutma/Doğrudan Evaporatif Soğutma	$t_{p,dbin} = 27-49^{\circ}C$ $t_{p,wbin} = 15-33^{\circ}C$ $V_p = 1700, V_s = 0,236 m^3/s$	Evet
9		Dolaylı Evaporatif Soğutma	$t_{p,dbin} = 26^{\circ}C - 33^{\circ}C$ $V_p = 679-1024 m^3/h$ $V_s = 605 - 755 m^3/h$ $t_{p,wbin} = 20^{\circ}C - 23^{\circ}C$	Evet



Şekil 7. Evaporatif soğutma sisteminin deneysel olarak gösterimi

Mevcut çalışmalarda dolaylı evaporatif soğutma için kullanılan ana değerlendirme indeksleri; yaş termometre verimliliği, çiğlenme noktası verimliliği, ısı transfer miktarı, genleşme katsayısı, COP, ısı verimi, gizli ısı verimi ve toplam ısı verimidir. Yaş termometre verimliliği, doğrudan evaporatif soğutucunun (doğrudan evaporatif soğutma) ve dolaylı evaporatif soğutucusunun en yaygın kullanılan performans değerlendirme endeksidir. Bu endeks; kuru kanaldaki giriş ve çıkış havasının arasındaki farkın birincil giriş havasının sıcaklığı ve yaş termometre sıcaklığının ikincil giriş havasına oranlanmasıyla elde edilir.

$$\eta_{wb} = \frac{t_{1,g} - t_{1,\zeta}}{t_{1,g} - t_{2,yg}} \quad (1)$$

Çiğlenme noktası; dolaylı evaporatif soğutma sisteminin havayı yaş termometre sıcaklığının altında soğutabildiği sıcaklıktır. Çiğlenme noktası verimliliği birincil hava sıcaklığının sıcaklığa yakın olduğu dereceyi yansıtır. Eşitlikte gösterildiği gibi ikincil yan çiğlenme noktası verimliliği;

$$\eta_{dp} = \frac{t_{1,giris} - t_{1,\zeta}}{t_{1,giris} - t_{1,\zeta}} \quad (2)$$

Duyulur ısı transferi, gizli ısı transferi ve toplam ısı transferi denklem (3)-(5) ile gösterilir.

$$Q_{duyulur} = M_p \cdot c_{p,g} (t_{1,giris} - t_{1,\zeta}) \quad (3)$$

$$Q_{gizli} = M_l \cdot r \cdot (d_{1,giris} - d_{1,\zeta}) \quad (4)$$

$$Q_{toplam} = M_l \cdot (h_{1,giris} - h_{1,\zeta}) = Q_{duyulur} + Q_{gizli} \quad (5)$$

Evaporatif soğutma sisteminde fanlar ve su pompaları sadece güç tüketimi ekipmanı genellikle COP ifade etmek için kullanılır. Eşitlikte gösterilen iklimlendirme sisteminin enerji verimliliği seviyesi;

$$COP = \frac{Q}{P_{fan} + P_{pompa}} \quad (6)$$

Spreyleme sistemindeki sirkülasyonlu su pompasının güç tüketimi, püskürtme sırasında güç sensörü tarafından ölçülen 0.022 kW, su hacmi ise 3 lt/dk'dır. Birincil güç tüketimi ve hava debisi 400 m<sup>3</sup> güç tüketimi ise 0,058 kW'dır.

Sistem kuru ortamda çalışırken, sadece birincil fanlar varken sistemde çalışan ikincil yan fanların toplam güç tüketimi 0.116 kW'ti. Sistem ıslak ortamda çalışırken, sistemdeki güç tüketim ekipmanı spray içeriyordu.

Su sirkülasyon pompası ve birincil ve ikincil yan fanların güç tüketimi 0.138 kW'dı. Genişleme faktörü, toplam ısı transferinin duyulur ısıya oranıdır. Eşitlikte gösterildiği gibi ısı transferi;

$$\beta = \text{Genişleme Faktörü} = \frac{Q_{toplam}}{Q_{duyulur}} \quad (7)$$

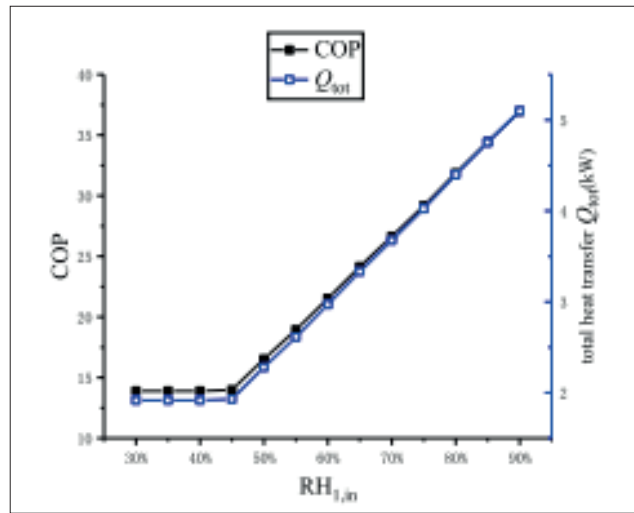
Dimitrov [30] duyulur, gizli ve toplam ısı geri kazanımından bahsetmiştir. Eşitlikte gösterildiği gibi verimlilik; (8)-(10).

$$Q_{duyulur} = \frac{t_{1,giris} - t_{1,\zeta}}{t_{1,giris} - t_{2,giris}} \quad (8)$$

$$Q_{gizli} = \frac{d_{1,giris} - d_{1,\zeta}}{d_{1,giris} - d_{2,giris}} \quad (9)$$

$$Q_{toplam} = \frac{h_{1,giris} - h_{1,\zeta}}{h_{1,giris} - h_{2,giris}} \quad (10)$$

Dolaylı evaporatif soğutma sisteminin COP varyasyonu Şekil 8’ de toplam ısı kazancınıninkıyla tamamen tutarlıdır. Şekil 8’de değerlendirme endeksinin bükülme noktası yaklaşık %40’tır. Bir yandan birincil hava kanallarındaki yoğuşmadan kaynaklanan bağıl nem artarken bir yandan yoğuşma arttıkça gizli ısı verimliliğinin artması daha olasıdır. Öte yandan, yoğuşmanın kademeli olarak artmasıyla, duyulur ısı transfer katsayısı kademeli olarak azalır. Ancak toplam ısı transferi artmaya devam eder. Sonuçlar gizli ısının ısı transfer verimliliğinin duyulur ısınıninkinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bağıl nem %90’a ulaştığında, gizli ısı transferi 3.89 kW’tır. Bu da 1.21 kW’lık toplam ısı transferinin 3.21 katıdır. Özetle, tek değerlendirme endeksi ile tutarlı olan toplam ısı transfer değişimi COP ile tutarlı iken, yaş ortamdaki verimliliğin değişimi yoğuşma olmaması durumu ile tutarlıdır. Gizli ısı verimliliği ve genleşme katsayısı yoğuşma olmaması durumunda sabit kalır. Toplam ısı verimi ve çığlenme noktasının değişimi sırasında ısı transferi, verimlilik ve çığlenme noktası toplam ısı transferinden oldukça farklıdır.



Şekil 8. COP'nin bağıl nem ve toplam ısı transferine göre değişimi [13]

Tablo 2. İşlem parametrelerinin sıcaklık ve bağıl neme etkisi

İşlem Parametrelerinin Etkisi	Girişteki Sıcaklık (°C)	Girişteki Bağıl Nem (%)	İkinci Giriş Sıcaklığı (°C)	İkinci Girişteki Bağıl Nem (%)
Girişteki Bağıl Nemin Etkisi	35	30-90	25	50
İlk Giriş Sıcaklığının Etkisi	28-38	50	25	50
İkinci Girişteki Bağıl Nemin Etkisi	35	50	25	35-65
İkinci Giriş Sıcaklığının Etkisi	35	50	20-30	50

#### 4. DEĞERLENDİRMELER

1. Birincil hava sıcaklığı ve nem değişiminin çıkış parametrelerine etkisini test etmek için bir çapraz akışlı dolaylı evaporatif soğutma sistemi deney sistemi kurulmuştur. Sistemin yaş termometre sıcaklık verimi, çığlenme noktası verimi, ısı transfer miktarı, genleşme katsayısı, COP, duyulur ısı verimi, gizli ısı verimi ve toplam ısı verimi, yoğuşmalı veya yoğuşmasız ısı değişimi olan birincil hava kanalları koşulu altında hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Karşılaştırmalı analiz, mevcut ısı transferi değerlendirme indekslerinin, birincil yan yoğuşma

olduğunda dolaylı evaporatif soğutmanın toplam ısı transfer kapasitesini değerlendiremediğini göstermiştir. Tüm değerlendirme endeksleri arasında COP, toplam ısı transferinin değişimi ile tutarlı gibi görünmektedir; ancak dolaylı evaporatif soğutma sisteminin enerji geri kazanım faydasını değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu nedenle dolaylı evaporatif soğutma sistemi ısı değişim kapasitesini değerlendirmek için kullanılamaz.

2. Dolaylı evaporatif soğutucu için entalpi verimliliği adı verilen yeni bir değerlendirme endeksi önerilmiştir. Birincil ve ikincil havanın sıcaklığı ve nemi değiştiğinde →

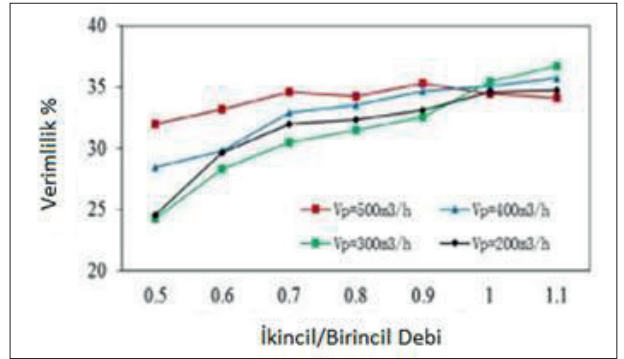
çıkış parametreleri ölçülmüştür. Entalpi verimi, yoğunlaşmalı veya yoğunlaşmaz olarak hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Entalpi verimliliğinin, toplam ısı transferinin değişimi ile oldukça tutarlı olduğu bulunmuştur; bu, entalpi verimliliğinin, çapraz akışlı dolaylı bir evaporatif soğutma sisteminin ısı transfer performansını değerlendirmek için kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır.

3. Diğer literatürdeki çapraz akışlı dolaylı evaporatif soğutma sistemi sayısal simülasyon verileriyle birleştirilen karşılaştırmalı analiz, entalpi verimliliğinin değişiminin, değişken giriş havası sıcaklığı koşulu altında toplam ısı transferininkine tutarlı olduğunu göstermektedir. Kuru ve ıslak kanaldaki nem, bu entalpi verimliliğini kanıtlar. Plaka çapraz akış dolaylı evaporatif soğutmanın ısı değişim kapasitesini değerlendirmek için kullanılabilir.

4. Birincil hava geçişinin sıcaklık dağılım aralığı dolaylı evaporatif soğutma için genellikle 20°C ila 30°C arasındadır. Sıcak ve nemli bölgeler, dolaylı evaporatif soğutma kanalları için verimli yerler olacaktır. Yoğuşma nedeniyle lejyonella bakterilerinin ve diğer organizmaların büyümesi nedeniyle düzenli temizlik, ultraviyole sterilizasyon, ozon sterilizasyonu veya diğer sterilizasyon yöntemleri

(Kirli havanın odaya girmesini önlemek için birincil kanal havasının iklimlendirilmesi) uygulanır.

5. Dolaylı evaporatif soğutma sisteminin termal hesaplaması ve ekipman seçimi toplam ısı değişim performansını ifade edebilen değerlendirme endeksinin hesaplanması Şekil 9'da görülmektedir. Önerilen entalpi verimliliği plakanın toplam ısı değişim performansını karakterize edebilir. Gelecekteki çalışmalarda entalpinin uygulanabilirliği, M-çevrim ve diğer dolaylı evaporatif soğutma sistemlerinin ısı transfer performansına olan etkisi araştırılacaktır.[13]



Şekil 9. Farklı debilerde dolaylı evaporatif soğutma sisteminin performans göstergeleri [31]

Tablo 3. Farklı debilerde dolaylı evaporatif soğutma sisteminin performans göstergeleri [31]

Birincil Hava Debisi (m³/h)	Maximum Verimlilik	Ortalama Verimlilik	Minimum Verimlilik
500	%35.4	%34.0	%32.0
400	%35.7	%32.9	%28.4
300	%36.7	%31.3	%24.3
200	%34.8	%31.6	%24.6

## KAYNAKLAR

[1]Maclainecross, I. L. and P. J. Banks (1981). A General-Theory of wet surface heat exchangers and its application to regenerative evaporative cooling. Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme 103(3). 579-585.  
[2]Erens, P. J. and A. A. Dreyer (1993). Modeling of indirect evaporative air coolers. International Journal of Heat and Mass Transfer. 36(1), 17-26.  
[3]Zhao, X., J. M. Li and et al. (2008). Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling. Applied Thermal Engineering, 28(14-15). 1942-1951.  
[4]Bilge D. ve Bilge M. (1999). İndirek/Direk evaporatif soğutma sistemleri kombinasyonu, IV. Ulusal Tesisat

Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 197-204, İzmir.  
[5]Antonellis, S., Joppolo, C., M., Liberati P., Milani S. ve Molinaroli L. (2016). Experimental analysis of a cross flow indirect evaporative cooling system. Energy and Buildings 121. 130-138.  
[6]Liberati P., Antonellis S., D., Leone C., Joppolo C., M. ve Bawa Y. (2017). Indirect evaporative cooling systems, modelling and performance analysis. Energy Procedia 140. 475- 485  
[7]Hasan, A. (2010). Indirect evaporative cooling of air to a sub-wet bulb temperature, Applied Thermal Engineering, 30, 2460-2468.  
[8]Al Malaki, F. A. M. K. (2017). Reduction of energy consumption in HVAC systems of prison halls in Iraq, Yüksek Lisans Tezi, Türk Hava Kurumu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [9]Kim M-H. ve Jeong J-W. (2013). Cooling Performance of a %100 outdoor air system integrated with indirect and direct evaporative coolers. *Energy* 52, 245-257.
- [10]El-Dessouky H., Ettouney H., Al-Zeefari A. (2004). Performance Analysis of TwoStage Evaporative Coolers. *Chemical Engineering Journal* 102, 255-266.
- [11]Farmahini-Farahani M., Delfani S. ve Esmaeelian J. (2012). Exergy Analysis of Evaporative Cooling to Select The Optimum System in Diverse Climates, *Energy* 40, 250-257.
- [12]Arıca S.Ö. (2019). Bir Dolaylı Evaporatif Soğutma Sisteminin Geliştirilmesi ve Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [13]Qilong Liu, Chunmei Guo, Xuelian Ma, Yuwen You, Yan Li, Experimental study on total heat transfer efficiency evaluation of an indirect evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering* 174 (2020) 115287.
- [14]Muhammad Burhanb , Doskhan Ybyraiykmb, Seung Jin Ohc, Kim Choon Ngb, An improved indirect evaporative cooler experimental investigation, *Muhammad Wakil Shahzada, Applied Energy* 256 (2019) 113934
- [15]Qiu G. A Novel Evaporative/Desiccant Cooling System [PhD]. The University of Nottingham; 2007.
- [16]Tulsidasani T, Sawhney RL, Singh SP, Sodha MS. Recent research on an indirect evaporative cooler (IEC) part 1: optimization of the COP. *International Journal of Energy Research* 1997:21.
- [17]Jain D. Development and testing of two-stage evaporative cooler. *Building and Environment* 2007;42(7):2549-54.
- [18]Velasco Gomez E, Tejero Gonzalez A, Rey Martinez FJ. Experimental characterisation of an indirect evaporative cooling prototype in two operating modes. *Applied Energy* 2012;97(0):340-6.
- [19]Jiang Y, Xie Xiaoyun. Theoretical and testing performance of an innovative indirect evaporative chiller. *Solar Energy* 2010;84(12):2041-55.
- [20]Costelloe B, Finn D. Indirect evaporative cooling potential in air-water systems in temperate climates. *Energy and Buildings* 2003;35(6):573-91.
- [21]Zhiyin Duan a , Changhong Zhan b , Xingxing Zhang a , Mahmud Mustafa a, Xudong Zhao a,n, Behrang Alimohammadisagvand c, Ala Hasan, Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 6823-6850.
- [22]Florides, G.A., Tassou, S.A., Kalogirou, S.A., Wrobel, L.C. (2002). Review of solar and low energy cooling technologies for buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 557-572.
- [23]Bedir O, T. (2016). Ev Tipi Evaporatif Soğutucu Performans Karakteristiklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [24]Osma E. (2011). Evaporatif Soğutma Sistemlerinin Mekanik Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sistemleri ile Termodinamik ve Ekonomik Bakımdan Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- [25]Williams L. M. (1995). Investigation of The Performance of Evaporative Cooling Systems, Master Thesis, Nova Scotia Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kanada.
- [26]Maisotsenko V, GillanLE, Heaton TL, Gillan AD. Method and Plate Apparatus for Dew Point Evaporative Cooler. F25D 17/06; F28C 1/00; F28D 5/00 ed. United States 2003.
- [27]Elberling L. Laboratory Evaluation of the Coolerado Cooler-Indirect Evaporative Cooling Unit. Pacific Gas and Electric Company; 2006.
- [28]Idalex, The Maisotsenko Cycle-Conceptual. A Technical Concept View of the Maisotsenko cycl. 2003.
- [29]Zhao X, Li JM, Riffat SB. Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling. *Applied Thermal Engineering* 2008;28(14-15):1942-51.
- [30]Stoitchkov NJ, Dimitrov GI. Effectiveness of crossflow plate heat exchanger for indirect evaporative cooling: efficacy' des e' changeurs thermiques aplaques, a courants croises pour froidissement indirect e 'vaporatif. *International Journal of Refrigeration* 1998;21(6):463-71.
- [31]Wang F., Sun T., Hang X., Chen Y., Yang H., Experimental research on a novel porous ceramic tube type indirect evaporative cooler, *Applied Thermal Engineering* 125 (2017) 1191-1199.

## ÖZGEÇMİŞ

### Sena Özlem ARICA

10.11.1988'de İsviçre'de doğdu. 2010 yılında Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirdi. 2012 yılında TOBB ETÜ Makina Mühendisliği bölümünde yüksek lisansını tamamladı. 2019 yılında Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünden doktor ünvanını kazandı. 2017 yılında İklimlendirme ve Sanayi İhracatçılar Birliği (İSİB) Yarışması'nda Dönel Çarklı Dolaylı Evaporatif Soğutma Sistemi projesiyle üçüncülük ödülüne layık görüldü. Halı hazırda Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nda Dr. Makina Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Ağır vasıta araçlarda içten yanmalı motorlar ve dolaylı evaporatif soğutma konularında bir çok makalesi bulunmaktadır.