



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

FAN-COIL ÜNİTESİ KOMPONENTLERİNİN BÜTÜNLEŞİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

AKBAR FIROUZAR
ÜNİTES

FAN-COIL ÜNİTESİ KOMPONENTLERİNİN BÜTÜNLEŞİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Integrated Performance Evaluation of Fan-coil Unit Components

Akbar FIROUZAR

ÖZET

Fan-coil üniteleri, ısıtma, soğutma, havalandırma ve iklimlendirme sektöründe, iç mekânlarda en çok tercih edilen cihazlardır. Bu cihazlar iç mekânlarda çalıştığı için verimli ve sesiz çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bir fan-coilde havanın akış yapısı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Pazarda en sık kullanılan gizli tavan tipi bir fan-coil ünitesi üzerinde performans testleri üç farklı fan hızında uluslararası standartlara uygun tasarlanan bir test sisteminde yapılmıştır. Hava akış simülasyonları için Flow Vision HPC sürüm 3.08 yazılımı kullanılmıştır. Testler için kullanılan fan-coil sayısal olarak analiz edilmiş, simülasyon sonuçları test sonuçları ve batarya üreticisinin verdiği veriler ile karşılaştırılarak sayısal simülasyonlar doğrulanmıştır. Simülasyonlar ile elde edilen hız ve basınç dağılımlarından yararlanılarak, batarya yüzeyindeki akış yapısı analiz edilmiştir. Bu analizler ile batarya-fan arasındaki mesafenin batarya üzerindeki hız dağılımını etkilediği görülmüştür. Akış analizlerinde yüksek fan hızında, diğer hızlara göre daha kritik akış olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda, yüksek fan hızında, fan ve batarya arasındaki mesafeyi ile değiştirerek, batarya yüzeyinde daha homojen hava hızı dağılımı elde edile bilindiği düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fan-Coil, Performans testi, Sayısal analiz, Enerji sınıfı.

ABSTRACT

Fan-coil units are the most preferred devices for indoor locations in heating, ventilating, air conditioning and refrigeration sector. Due to being indoor unit, efficient and quiet operating of these units is so important. Experimental and numerical study on airflow structure of a fan-coil unit was investigated in this paper. Performance tests of a concealed type unit which is frequently used one were done in three different fan speeds. Flow Vision HPC version 3.08 software was used for simulating the airflow. Numerical analysis of the fan-coil used for tests was done, the results of simulations were verified by comparing them with test results and technical information given from the coil manufacturer. Airflow structures were analyzed by utilizing the velocity and pressure contours obtained from simulations. By analyzing the results was found out that the distance between fan and coil affects the velocity contours over the coil. In flow analysis, the high fan speed state were determined more critical compared with others. At the end of the study, in high fan speed state, by changing the distance between fan and coil and checking the uniformity of air spreading over coil, obtaining more homogeneous air velocity spreading on coil was considered.

Key Words: Fan-Coil, Performance test, Numerical analysis, Energy class.

1. GİRİŞ

İnsanların konfor talebinin artmasına ve teknolojinin gelişimine paralel olarak, iç mekânların insan sağlığı ve konforu için en uygun şartlarda tutulması ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bunun sonucu

olarak iklimlendirme sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. İklimlendirme sistemlerinin önemli bir parçası olan iç ünitelerden fan-coil (FC), soğutma ve ısıtma ihtiyacını karşılamak için sıklıkla kullanılan bir cihazdır. Fan-coillerin tavan, döşeme ve duvar tipi değişik tipleri mevcuttur. Mekân kullanımını daha verimli kıldığı, gereksiz tesisat ve cihaz görüntüsüne engel olduğu, konfor performansı daha yüksek olduğu için, son zamanlarda, gizli tavan tipi FC diğer tiplere göre daha fazla tercih edilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada gizli tavan tipi FC ünitelerinin performansı analiz edilmiştir.

FC ünitelerinin performansı, ana bileşenlerinin tipine ve bu bileşenlerin cihazdaki yerleşimlerine bağlıdır. Bu ünitelerin tasarımında, cihazın kompakt bir yapıya sahip olması büyük önem taşımaktadır. Bataryadan etkin bir şekilde faydalanmak için havanın batarya yüzeyine homojen yayılması gerekmektedir. Performansı etkilememek şartıyla, batarya ile fan arasındaki minimum mesafeyi bulmak, tasarımcıların problemlerinden birisidir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı yardımıyla, havanın batarya yüzeyine dağılımı ve batarya ile fan arasındaki mesafenin hava akışına etkisi analiz edilebilir.

Bir FC ünitesinin hava akış analizini yapabilmek için, o ünitenin fiziksel boyutlarına ve giriş şartlarındaki kütleli hava debisine ihtiyaç duyulmaktadır. Tanımlanan şartlardaki FCnin kütleli hava debisini ancak test yaparak belirleyebiliriz. Bu nedenle analiz için seçilen cihazı laboratuvar ortamında istenilen iklim şartlarında, standartlara uygun bir test düzeneğinde test etmek gerekmektedir.

Çeşitli sebeplerden dolayı FCnin soğutma konumu, ısıtma konumundan daha kritiktir. Bu nedenle, üreticiler fan-coil tasarımını soğutma şartlarını esas alarak yapmaktadırlar. Bu çalışmada da iki borulu gizli tavan tipi bir FCnin soğutma konumundaki performans analizleri yapılmıştır.

Giriş havası ve su şartları Eurovent test normlarına göre seçilmiştir ve hesaplamalarda ASHRAE ve AMCA standartlarının hesap metotları kullanılmıştır. Test düzeneğinde kullanılan ölçüm aletleri, ilgili standartların belirlediği hassasiyet aralığında seçilmiştir. Testlerin hata payını azaltmak için, oda şartları dengeye ulaştıktan sonra, belirli bir zaman aralığında ölçüm değerleri kaydedilmiştir.

2. FAN-COİL ÜNİTESİ

Fan-coil üniteleri iç mekânlarda ısıtma ve/veya soğutma için kullanılan en temel iklimlendirme cihazıdır. Fan yardımıyla, mahalden veya kanal ile dışardan alınan hava, önce girişe yerleştirilmiş olan filtreden, sonra batarya üzerinden geçirilerek ısıtılan veya soğutulan hava, mahalle uygun bir açıda üflenir. Bataryaya, soğuk su veya soğutucu akışkan girerse sistem ortama serin hava (soğutma konumu), sıcak su girerse sıcak hava üfler (ısıtma konumu).

FCler oteller, çok katlı ofis binaları, hastaneler, turizm tesisleri, restoranlar ve alışveriş merkezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ünitelerin yatırım maliyetleri orta düzeyde olup ve işletme maliyetleri çok uygundur.



Resim 1. Gizli tavan tipi fan-coil ünitesi.

2.1. Fan-coil Bileşenleri

FC cihazı bileşenlerini, ana bileşenler ve yardımcı bileşenler olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Ana bileşenler cihazın yapısını oluşturmakta olup ve onlar olmadan cihaz çalışmaz. FC ünitesi çalışma konumu, yeri ve şekline göre yardımcı bileşenlere ihtiyaç duymaktadır.

2.1.1. Ana Bileşenler

Batarya, fan, elektrik motoru, hava filtresi ve gövde FCnin beş ana bileşenini oluşturmaktadır. Aşağıda her ana bileşen için kısa açıklamalar yapılmıştır.

2.1.2. Yardımcı Bileşenler

Yoğuşma tavası, damlalık, elektrik terminali, akışkan bağlantı kiti, hava purjörü ve termostatlar FCnin yardımcı bileşenleri olarak tanımlanırlar.

2.2. Fan-coil Tasarım Kriterleri

FC üniteleri iç mekânlarda hem ısıtma ve hem soğutma amaçlı kullanıldıkları için, iki konumu da ayrı ayrı incelemek gerekmektedir. Soğutma konumunda, giriş havası çığ noktası sıcaklığı yüksek olduğu için, havanın içerdiği suyun bir miktarı yoğuşmaktadır. Drenaj tavası, bataryadan akan ve cihaz iç yüzeyinde terlemeden oluşan suların cihazdan gidere doğru yönlendirme görevini yapmaktadır. Bu tava su ile sürekli temasta olduğu için bakterilerin ürümesine müsait bir ortamdır. O yüzden eğimli olması ve korozyona dayanımlı bir materyale kaplanması gerekmektedir. Ayrıca, cihazın akışkan bağlantı kısmında terlemeden oluşan damlalara da dikkat edilmelidir.

Yoğuşan su ile alüminyum lamelin temas açısı büyük olduğu için lamel üzerinde damlalar oluşur ve bu damlalar lameller arası su köprüleri oluşturur ve batarya basınç kaybını artırır. Bu direnç artışı hava debisinin düşmesine sebep olur. Nem oranı yüksek olan mahallerde hidrofilik kaplı bataryanın kullanımı ciddi bir fayda sağlamaktadır [1].

Isıtma konumunda, yoğuşma ve terleme olmadığı için cihazın hava debisi miktarı soğutma konumuna kıyasla büyük olmaktadır ve bu motor tarafından daha fazla akım (enerji) çekmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, bu debi artışı batarya yüzey hava hızını artırmaktadır. Hava hızının artışı cihazın ses seviyesinin artmasına sebep olmaktadır. Ses seviyesi bu cihazların kritik sorunlarından birisidir.

Fan-coil tasarımında, cihazın hafif ve parça sayısının az olmasına, elektrik terminalinin su bağlantı ve terleme ihtimali olan yerlerden uzak olmasına dikkat edilmelidir. Oda tipi FClerde kaset estetiği, dayanımı ve hava üfleme açısı büyük önem taşımaktadır. Cihazın filtresini, basınç kaybının az olması ve yıkanılabilirliği kullanıcılar tarafından talep edilmektedir, o yüzden son zamanlarda Mesh filtrelerin kullanımı yaygınlaşmıştır.

3. Deneysel Çalışma

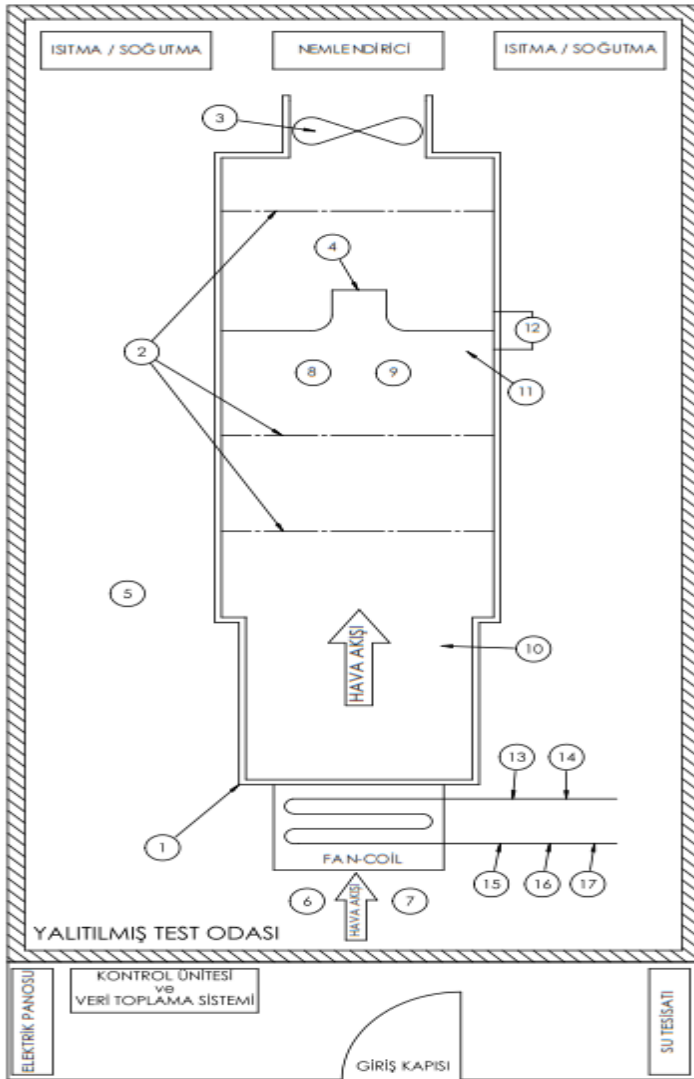
Fan-Coil (FC) ünitelerinin hava debisi değişken olup, fanın önündeki direnç (basınç kaybı) ve giriş havası şartlarından etkilenir. Bundan dolayı, değişik hava giriş (çevre) şartlarında ve fan devir sayısında, ünitenin debisinin ilgili standartlara uygun olarak belirlenmesi gerekir. Aynı zamanda, belirlenen su ve hava giriş sıcaklıklarında fan-coilllin ısıtma ve soğutma (ısı) kapasitesinin de belirlenmesi gerekir. Bu testler genellikle bir sertifikasyon kurumunun belirlemiş olduğu şartlarda yapılır. Bu çalışmada, çok sayıda ülkede tanınmış olan EUROVENT'in belirlemiş olduğu kriterlere uygun olarak testlerin yapılabilmesi için, yine çok sayıda ülkede geçerliliği kabul edilmekte olan

ASHRAE normlarına uygun bir test odası ve test sistemi kurulmuştur. Test sisteminde kullanılan ölçüm aletleri ve kullanılan hesap metotları ASHRAE standartlarına uygun seçilmiştir.

Kütleli debi hesaplarında AMCA standardı hesap metodu kullanılmıştır. Deneysel çalışma esnasında, debi hesaplaması için belirsizlik analizi yaparak, sonucu büyük oranda etkileyen ölçüm noktalarına daha fazla dikkat edilmiştir.

3.1. Test Odası ve Test Düzeneği

Fan-coil testlerinde kullanılacak olan sistemlerin uyması gereken değişik standartlar vardır. Bunlardan en önemli ve en kapsamlı olanı ASHRAE tarafından geliştirmiş olan ASHRAE 79-2006 (Method of Testing for Rating Fan-coil Conditioners) standardıdır. Çalışma kapsamında bu standarda uygun olan test sistemi kullanılmıştır. Standarda uygun olarak tasarımı yapılmış ve kurulmuş olan test odası ve test sistemi şematik olarak Şekil 1’de verilmiştir.



1. Isıl olarak yalıtılmış kanal
2. Akış düzenleyiciler
3. Frekans inverter kontrollü fan
4. Akış lülesi
5. Atmosfer basınç ölçüm noktası
6. FC giriş havasının sıcaklık ölçüm noktası
7. Giriş havası çiğ noktası sıcaklık ölçüm noktası
8. Lüle girişi sıcaklık ölçüm noktası
9. Lüle girişi çiğ noktası sıcaklık ölçüm noktası
10. FC çıkışı statik basınç ölçüm noktası
11. Lüle girişi statik basınç ölçüm noktası
12. Lüle fark basınç ölçüm noktası
13. Giriş suyu sıcaklık ölçüm noktası
14. Giriş suyu basınç ölçüm noktası
15. Çıkış suyu sıcaklık ölçüm noktası
16. Çıkış suyu basınç ölçüm noktası
17. Su debisi ölçüm noktası

Şekil 1. Fan-coil test odası ve test sisteminin şeması.

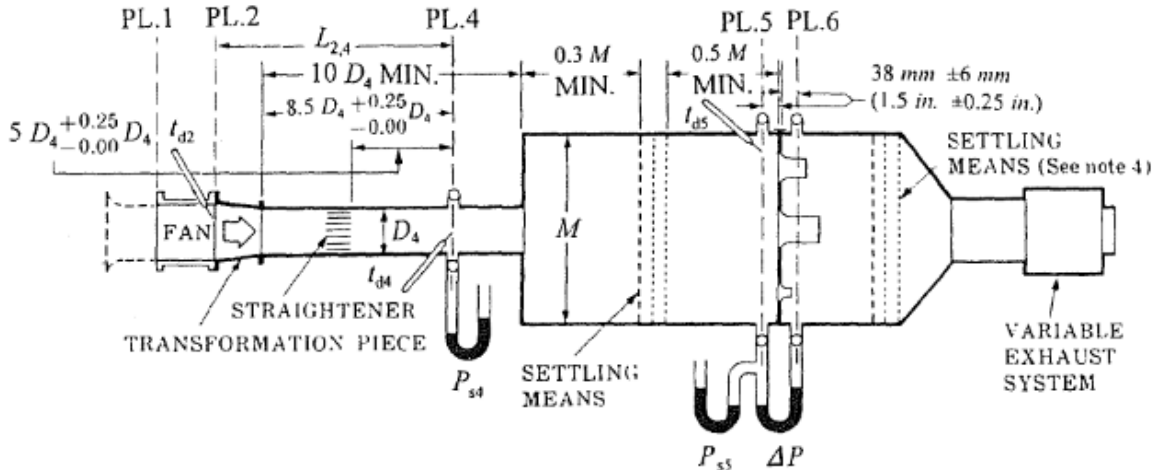
İlgili standartlar, çevre basıncı, nem oranı, sıcaklık, su giriş ve çıkış sıcaklıkları gibi şartların sabit tutulmasını gerektirmektedir. Bunun için, test sistemi ısılsal olarak yalıtılmış bir oda içerisine kurulmuştur. Oda içerisinin nemini ve sıcaklığını sabit tutabilmek için soğutma, ısıtma ve nemlendirme sistemleri test odasına monte edilmiştir. İki adet oransal kontrollü FC ünitesi, test odası havasını ısıtmak veya

soğutmak için kullanılmaktadır. Bu cihazlar, ısıtma testi yapıldığında, soğutma yaparak ve soğutma testi yapıldığında, ısıtma yaparak odanın sıcaklığını belirlenmiş olan sıcaklıkta sabit tutulmasını sağlar. Soğutma testlerinde, odanın havasını nemlendirmek için oransal kontrol sistemine sahip olan bir atomizer nemlendirici kullanılmıştır. Nemlendirici, odanın bağıl neminin istenilen değerde sabit tutulmasını sağlamaktadır.

Fan-coile giren su, bir soğutma grubunda istenilen sabit sıcaklığa soğutulmuş olarak cihaza verilmektedir. Giriş suyunun debisi, manyetik debi ölçer ile ölçülmektedir. Su debisi ayarı elektronik kontrollü üç yollu vana yardımıyla yapılmıştır.

Değişik fan devirlerinde, fan-coil debisinin ve soğutma/ısıtma kapasitesinin ölçülebilmesi için, standartlara uygun olarak tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiş olan ölçüm sistemi test odasına yerleştirilmiştir. FCnin kanal içine üflediği hava, statik basınç ölçüm noktalarına gelmeden akış düzenleyiciden geçirilir. Bu işlem daha doğru basınç ölçmek için yapılmaktadır. Akış düzenleyiciden kaynaklanan basınç kaybını etkisizleştirmek için, kanalın çıkışı, frekans inverter kontrollü fan emişine bağlanmıştır. Test esnasında bu fanın devri değiştirilerek, fan-coilin çıkışında kanal içi statik basınç, kanal dışındaki statik basınca eşit olması sağlanmıştır.

Fanın sağladığı havanın debisi AMCA 210 standardına uygun olarak kurulmuş olan sistemle ölçülmüştür. Bu sistemin şematik görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Bu ölçüm sistemi, bir kanal, kanalın girişine monte edilmiş fan-coil cihazı, kanal içerisine monte edilmiş orifisler (lüleler) ve sıcaklık ve basınç ölçüm problemlerinden oluşmaktadır. Fan-coil giriş ve çıkışında hava sıcaklığını, nemini ve basıncını ölçmek için ölçüm duyguları standartlarda belirtildiği gibi yerleştirilmiştir. Fan ve elektrik motorunun cihazdaki yerleşim konumundan dolayı, fan-coillin emiş ve üfleme ağızlarında homojen bir sıcaklık dağılımı bulunmamaktadır. Bu yüzden sıcaklık ölçümleri birden fazla noktada yapılmıştır. Emiş havası (fan-coil giriş havası) sıcaklık ölçümü için 4 adet ve fan-coil çıkışında (lüle girişinde) 3 adet sıcaklık duygası kullanılmıştır.



Şekil 2. AMCA 210 standardının debi ölçüm sisteminin şeması [2].

Hava debisinin belirlenmesi için orifisler (lüle) ve statik fark basınç metodu kullanılmıştır. Bu metotta orifis (lüle) giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı çok hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu yüzden amaca uygun diferansiyel fark basınç transmitteri kullanılmıştır. Lüle seçimi, lüle boğazındaki akış hızına göre yapılması gerekmektedir. Lüle boğazından geçen hava hızının, 15 m/s - 36 m/s aralığında olmalıdır [3].

Havanın kuru termometre ve çığ noktası sıcaklıkları lüle ve cihaz girişinde yoğunluğu hesaplamak için ölçülmüştür. Atmosfer basıncını ölçmek için kullanılan atmosferik mutlak basınç duygası, fan-coil ile aynı yükseklik seviyesinde kanal dışına monte edilmiştir.

Test odasında bulunan oransal kontrollü ekipmanların kapasitesinin değiştirilmesi PLC yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Bu otomatik kumanda sistemi odayı rejimde tutmak için kullanılmıştır.

3.2. Test Koşulları

Ölçümlere başlamadan önce sistem çalıştırılarak hem oda iç şartlarının (sıcaklık, nem ve basınç) ve hem de suyun fan-coille giriş şartlarının (sıcaklık ve debi) önceden belirlenmiş olan değerlerde rejime ulaşması sağlanır. Soğutma testleri EUROVENT'te belirtilmiş olan su ve hava şartlarında yapılmıştır. İki borulu FC üniteleri için EUROVENT tarafından belirlenen su ve hava şartları Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. İki borulu FC ünitelerin EUROVENT'e uygun test koşulları [4].

	Isıtma	Soğutma	Terleme
Giriş havasının kuru termometre sıcaklığı [°C]	20	27	27
Giriş havasının yaş termometre sıcaklığı [°C]	Maks. 15	19	24
Giriş suyunun sıcaklığı [°C]	45	7	6
Çıkış suyunun sıcaklığı [°C]	40	12	10

3.3. Verilerin Değerlendirilmesi

Sayısal analizi yapılacak olan örnek fan-coil ünitesinin performans testleri yapılmıştır. Testler süresince elde edilmiş olan veriler kullanılarak, fan-coillin hava debisi, ısıl (soğutma) kapasitesi hesaplanmış ve enerji sınıfı belirlenmiştir.

3.3.1. Fan-coillin Hava Hacimsel Debisinin Hesaplanması

Fan-coillin hava hacimsel debisi, lüleden geçen havanın hacimsel debisi hesaplanarak belirlenmiştir. Lüledeki hava akış hacimsel debisinin hesaplanmasında Eş. 1 kullanılmıştır [2].

$$\dot{V}_n = A_n Y C_n \sqrt{2 \vartheta_n \Delta P} \quad (1)$$

Burada;

\dot{V}_n : Lüleden geçen havanın hacimsel debisi [m³/s]

A_n : Lüle çıkış boğazının alanı [m²] = $\pi d^2/4 = 0,00456 \text{ m}^2$

Y: Lüle genişleme faktörü (expansion factor), [boyutsuz]

C_n : Lüle boşaltma katsayısı (discharge coefficient), [boyutsuz]

ϑ_n : Lüleden geçen havanın özgül hacmi, [m³/kg]

ΔP : Lüle basınç kaybı, [Pa]

Eşitlik 1'de, ΔP değeri fark basınç transmitteri ile ölçülen değerdir. ϑ_n , Y ve C_n parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Özgül hacim ϑ_n Eş. 2, lüle boşaltma katsayısı C_n Eş. 5 ve lüle genişleme faktörü Y ise Eş. 14'den hesaplanabilir.

$$\vartheta_n = 0,287042 (T_n + 273,15) (1 + 1,607858 W_n) / P_n \quad (2)$$

Burada;

T_n : Lüle kuru termometre hava sıcaklığı [°C]

P_n : Lüle girişinde mutlak basınç [kPa]

W_n : Lüleden geçen havanın nem oranı [kg_{su}/kg_{kuru hava}]

Havanın nem oranı, W_n , ölçülen basınç değerleri kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir [5].

$$W_n = 0,621\ 945 \cdot P_{wn} / (P_n - P_{wn}) \quad (3)$$

Burada;

P_n : Lüle girişinde mutlak basınç [Pa]

P_{wn} : Lüle girişinde su buharının kısmi basıncı [Pa]

Lüle girişinde su buharının kısmi basıncı P_{wn} , Eş. 4'de mutlak sıcaklık değeri yerine mutlak çığ noktası sıcaklık değeri koyduğumuzda bulunur [5].

$$\ln P_{wn} = C_1 + C_2 / T + C_3 \times T + C_4 \times T^2 + C_5 \times T^3 + C_6 \times \ln T \quad (4)$$

Burada;

$$C_1 = 1,391\ 499\ 3$$

$$C_2 = -5,800\ 220\ 6\ E+03$$

$$C_3 = -4,864\ 023\ 9\ E-02$$

$$C_4 = 4,176\ 476\ 8\ E-05$$

$$C_5 = -1,445\ 209\ 3\ E-08$$

$$C_6 = 6,545\ 967\ 3$$

Eş. 4'den hesaplanan su buharı kısmi basıncı, Eş. 3 yerine konularak, lüle girişinde havanın nem oranı hesaplanır. Bu nem oranı değeri Eş. 2'de kullanılarak lüle girişinde havanın özgül hacmi elde edilir.

Lüle boşaltma katsayısı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir [2].

$$C_n = 0,9986 - (6,688 / \sqrt{Re}) + (131,5 / Re) \quad (5)$$
$$Re = D \cdot v / \mu \cdot \theta$$

Lüle boğazında yaklaşık hız Eş. 7'den bulunur.

$$V = \sqrt{2\Delta P\theta_n} \quad (7)$$

Nemli havanın viskozitesi Eş. 8'den bulunur [6].

$$\mu = \frac{\mu_a}{1 + \varphi_{av}} + \frac{\mu_v}{1 + \frac{\varphi_{va}}{X_m}} \quad (8)$$

$$\mu_a \times 10^6 = 0,404\ 01 + 0,074\ 582 \times T - 5,717\ 1 \times 10^{-5} \times T^2 + 2,992\ 8 \times 10^{-8} \cdot T^3 - 6,252\ 4 \times 10^{-12} \times T^4$$

(9)

$$\mu_v \times 10^6 = \frac{\sqrt{\frac{T}{647,27}}}{0,018\ 158\ 2 + 0,017\ 762\ 4 \left(\frac{647,27}{T}\right) + 0,010\ 528\ 7 \left(\frac{647,27}{T}\right)^2 - 0,003\ 677\ 44 \left(\frac{647,27}{T}\right)^3} \quad (10)$$

$$\varphi_{av} = \frac{\left[1 + \left(\frac{m_a}{m_v}\right)^{0,5} \times \left(\frac{m_a}{m_v}\right)^{0,25}\right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{m_a}{m_v}\right)^{0,5}} \quad (11)$$

$$\varphi_{va} = \frac{\left[1 + \left(\frac{m_a}{m_v}\right)^{0,5} \times \left(\frac{m_a}{m_v}\right)^{0,25}\right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{m_v}{m_a}\right)^{0,5}} \quad (12)$$

$$X_m = \frac{m_a}{m_v} \text{ W; } m_a = 28,97 \text{ [kg / kmol}_{\text{hava}}\text{]}; m_v = 18,02 \text{ [kg / kmol}_{\text{buhar}}\text{]} \quad (13)$$

Eşitlik 8-13'den nemli havanın viskozitesi bulunur ve bu değeri Eş. 6'ya koyduğumuzda Reynolds sayısı ve Eş. 5'den lüle boşaltma katsayısı elde edilir.

Lüle genişleme faktörü Eş. 14'den elde edilir [2].

$$Y = 1 - (0,548 + (0,71\beta^4)) (1-\alpha) \quad (14)$$

Burada;

β , lüle hidrolik çapının kanal hidrolik çapına oranı olup, lüle hidrolik çapı kanal hidrolik çapına göre çok küçük olduğu için, β çok küçüktür. Bundan dolayı, β^4 sıfır alınabilir [2].

α , lüle giriş ve çıkış mutlak basınçlarının birbirine oranıdır.

Eş. 14'den lüle genişleme faktörü bulunur. Eş. 2 ve Eş. 5'den lüle hacimsel debisi bulunur. Eş. 15 eşitliğini kullanarak lüleden geçen akışın kütleli debisi bulunur.

$$\dot{m}_n = V_n^* / \theta_n \quad (15)$$

Fan-coil soğutma konumunda test edildiği için, batarya yüzeyinde havanın içerdiği nemin bir miktarı yoğunlaşmaktadır. Dolayısıyla, cihaz ve lüle giriş kütleli debileri farklı olmaktadır. Cihaz kütleli hava debisi Eş 16'dan bulunabilir [5].

$$\dot{m} = \dot{m}_n \frac{(1+W)}{(1+W_n)} \quad (16)$$

Sistemin kuru hava debisi ise Eş. 22'den bulunabilir.

$$m'_{ca} = \dot{m} / (1 + W) \quad (17)$$

3.3.2. Isıl Kapasitenin (Soğutma Kapasitesinin) Hesaplanması

ASHRAE 79-2006 standardına göre fan-coilin soğutma kapasitesi, hava ve su tarafı esas alınarak hesaplanan iki ayrı soğutma kapasitelerinin ortalamasına eşittir. Aşağıda bu çalışmada test edilen fan-coil ünitesinin su tarafı ve hava tarafı soğutma kapasitelerinin nasıl hesaplandığı anlatılmıştır.

Su tarafı soğutma kapasitesi

$$Q'_{tcw} = \dot{m}'_w c_{pw} (T_{w2} - T_{w1}) \quad (18)$$

Burada;

Q'_{tcw} : Su tarafı toplam soğutma kapasitesi, [kW]

\dot{m}'_w : Suyun kütleli debisi, [kg/s]

c_{pw} : Suyun özgül ısı, [kJ/kg°C]

T_{w2} : Su çıkış sıcaklığı, [°C]

T_{w1} : Su giriş sıcaklığı, [°C]

Bu çalışmada suyun özgül ısı değeri, giriş ve çıkış su sıcaklıklarının ortalaması (9,5°C) üstünden hesaplanmış ve kullanılmıştır.

$$c_{pw} = 4,198 \frac{kJ}{kg^\circ C} @ T_w = 7^\circ C$$

$$c_{pw} = 4,189 \frac{kJ}{kg^\circ C} @ T_w = 12^\circ C$$

$$c_{pw} = 4,1935 \frac{kJ}{kg^\circ C} @ T_w = 9,5^\circ C$$

Hava tarafı soğutma kapasitesi

Sistemdeki kütle ve enerji dengesinden aşağıdaki bağıntılar bulunabilir.

$$\dot{m} = \dot{m}_n + \dot{m}'_{civ} \quad (19)$$

$$\dot{m}h + Q'_{ca} = \dot{m}_n h_n + \dot{m}'_{civ} h_{civ} \quad (20)$$

$$Q'_{ca} = [\dot{m}_n h_n + \dot{m}'_{civ} h_{civ} - \dot{m}h] \quad (21)$$

Bu eşitliklerde;

\dot{m} : Fan-coilin emdiği havanın kütleli debisi, [kg/s]

\dot{m}_n : Lüleden geçen (fan-coil çıkış) havanın kütleli debisi, [kg/s]

\dot{m}_{cw} : Bataryada yoğuşan suyun kütleli debisi, [kg/s]

h : Oda havasının entalpisi, [kJ/kg]

\dot{Q}_{ca} : Bataryadan havaya ısı transferi, [kW]

h_n : Lüleden geçen havanın entalpisi, [kJ/kg]

h_{cw} : Yoğuşan suyun entalpisi, [kJ/kg]

Nemli havanın entalpisini hesaplamak için Eş. 22 kullanılmıştır [5].

$$h = 1,006T + W(25501 + 1,86T) \quad (22)$$

Burada T havanın sıcaklığı °C cinsinden ve W ise havanın nem oranı $\text{kg}_{\text{su}}/\text{kg}_{\text{kuru hava}}$ cinsindedir. Yoğuşan suyun entalpisini bulmak için doymuş suya ait olan termodinamik tabloları kullanılmıştır. Yoğuşan suyun sıcaklığı, bataryayı terk eden havanın çığ noktası sıcaklığı ile eşit kabul edilmiştir.

Batarya üzerinde yoğuşan suyun kütleli debisi Eş. 23'den bulunur.

$$\dot{m}_{cw} = \dot{m} - \dot{m}_n \quad (23)$$

Hava tarafı toplam soğutma kapasitesi Eş. 24'den hesaplanır.

$$\dot{Q}_{\text{toplam}} [\text{kW}] = \dot{Q}_{ca} + \frac{\dot{Q}_k - P_e}{1000} \quad (24)$$

Burada P_e elektrik motorun çektiği güç ve \dot{Q}_k ise batarya ile lüle arasında olan kanalın yüzeyinden odaya ısı transferidir (ısı kaybı). Fan-coil tarafından odaya üflenen havanın kinetik enerjisi ortama yayıldığında ısı enerjisine dönüşür. Dolayısıyla hava tarafı ısı kapasitesi hesabında, soğutma testinde motorun çektiği güç hava tarafı ısı transferi değerinden düşürmek ve ısıtma testinde ise toplamak gerekmektedir [7].

Isıl yalıtılmış kanaldan kaybedilen ısı miktarı (\dot{Q}_k) Eş. 25'den bulunur.

$$\dot{Q}_k = U_k A_k (T_a - T_n) \quad (25)$$

Burada;

\dot{Q}_k : Oda havasından kanal içi havasına ısı transferi, [W]

U_k : Yalıtılmış kanalın ısı transfer katsayısı, [W/m²°C]

A_k : FC çıkış ve lüle girişindeki ölçüm noktasının arasındaki kanalın yüzey alanı, [m²]

Kanal ısı transferi katsayısı Eş. 26'yı kullanarak hesaplanmıştır [12].

$$U_k = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{\frac{1}{h_{ha}} + \frac{1}{h_{sa}} + \frac{t_1}{k_y} + \frac{t_2}{k_s}} = \frac{1}{\frac{1}{34} + \frac{1}{10} + \frac{0,025}{0,037} + \frac{0,001}{15}} = 1,24 \quad (26)$$

Bu eşitlikte, kanal iç yüzeyinde ısı taşınım katsayısı (h_{ha}) 34 W/m².°C, kanal dış yüzeyinde ısı taşınım katsayısı (h_{sa}) 10 W/m².°C, 25 mm kalınlığında olan yalıtım malzemesinin termal iletkenlik katsayısı (k_y) 0,037 W/m°C ve 1 mm kalınlığında olan paslanmaz sacın (kanal sacı) termal iletkenlik katsayısı (k_s) 15 W/m°C alınmıştır. A_k değeri ise yaklaşık 8 m² olarak hesaplanmıştır. FCnin elektrik motorunun çektiği güç ise güç ölçüm cihazı ile test esnasında ölçülmüştür. Böylece hava tarafı soğutma kapasitesi hesaplanabilmektedir.

Fan-coilin soğutma kapasitesi Eş. 27'den bulunur.

$$\dot{Q}_c = \frac{\dot{Q}_{ca} + \dot{Q}_{cw}}{2} \quad (27)$$

Duyulur soğutma kapasitesi ise Eş. 28'den hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_s = c_{pa}(m \cdot T_a - m_i \cdot T_n) + \left(\frac{Q_k}{1000} \right) \quad (28)$$

Burada \dot{Q}_s duyulur soğutma kapasitesi (sensible cooling capacity) kW cinsinden ve c_{pa} ise havanın özgül ısıdır ve $1,0056 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ olarak kabul edilmiştir. Fan-coilin gizli (latent) soğutma kapasitesi (\dot{Q}_l) ise Eş 29'dan bulunur.

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_c - \dot{Q}_s \quad (29)$$

Duyulur ısı oranı (D.I.O) ise Eş. 30'dan bulunur.

$$D.I.O = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_c} \quad (30)$$

Duyulur ısı oranını giriş su ve hava şartları, çevre basıncı ve batarya yapısı gibi parametreler etkilemektedir.

3.3.3. Fan-coilin Enerji Sınıfının Belirlemesi

Üç hızlı fan-coil ünitesi için EUROVENT tarafından belirlenen fan-coil enerji etkinlik oranı (FCEER) soğutma modu için ve fan-coil performans katsayısı (FCCOP) ısıtma modu için sırasıyla Eş. 31 ve Eş. 32'de verilmiştir [4].

$$FCEER = \frac{0,65 \times \dot{Q}_{cl} + 0,3 \times \dot{Q}_{cm} + 0,05 \times \dot{Q}_{ch}}{0,65 \times P_{acl} + 0,3 \times P_{acm} + 0,05 \times P_{ach}} \quad (31)$$

$$FCCOP = \frac{0,7 \times \dot{Q}_{hl} + 0,25 \times \dot{Q}_{hm} + 0,05 \times \dot{Q}_{hh}}{0,7 \times P_{ahl} + 0,25 \times P_{ahm} + 0,05 \times P_{ahh}} \quad (32)$$

Burada;

\dot{Q}_{cl} : Düşük devirde, FCnin soğutma kapasitesi, [kW]

\dot{Q}_{cm} : Orta devirde, FCnin soğutma kapasitesi, [kW]

\dot{Q}_{ch} : Yüksek devirde, FCnin soğutma kapasitesi, [kW]

\dot{Q}_{hl} : Düşük devirde, FCnin ısıtma kapasitesi, [kW]

\dot{Q}_{hm} : Orta devirde, FCnin ısıtma kapasitesi, [kW]

\dot{Q}_{hh} : Yüksek devirde, FCnin ısıtma kapasitesi, [kW]

P_{acl} : Soğutma modunda, düşük devirde, FC motorunun çektiği güç, [kW]

P_{acm} : Soğutma modunda, orta devirde, FC motorunun çektiği güç, [kW]

P_{ach} : Soğutma modunda, yüksek devirde, FC motorunun çektiği güç, [kW]

P_{ahl} : Isıtma modunda, düşük devirde, FC motorunun çektiği güç, [kW]

P_{ahm} : Isıtma modunda, orta devirde, FC motorunun çektiği güç, [kW]

P_{ahh} : Isıtma modunda, yüksek devirde, FC motorunun çektiği güç, [kW]

Fan-coil ünitelerinin ısıtma ve soğutma modları için farklı enerji sınıfı tanımlanır. Elde edilen enerji etkinlik oranı (soğutma modu için) ve performans katsayısı (ısıtma modu için) değerlerini kullanarak Tablo 2'den FC ünitesini enerji sınıfı ısıtma ve soğutma modu için bulunur.

Tablo 2. FC ünitesi için EUROVENT tarafından belirlenen enerji sınıfı tablosu [4].

Enerji Sınıfı	Soğutma Modu	Isıtma Modu
A	FCEER \geq 185	FCCOP \geq 265

B	185>FCEER>=120	265>FCCOP>=160
C	120>FCEER>=80	160>FCCOP>=100
D	80>FCEER>=55	100>FCCOP>=70
E	55>FCEER>=40	70>FCCOP>=50

3.4. Deneysel Bulgular ve Tartışmalar

Oda sıcaklığını, nemini, giriş suyu debisini ve sıcaklığının standartlarda belirtilen değerlerde dengeye getirdikten sonra her 5 saniye aralıkla 500'e yakın ölçüm yapılmış ve ölçülen değerler veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Standart tolerans dışında kalan ölçümler elenmiştir. Kalan data serilerinde, her bir parametrenin değerlerinin ortalaması hesaplarda kullanılmıştır. Testler fan-coil fanının üç farklı hızı için tekrarlanmıştır (üç hız kademeli motor). Elenmiş veri serilerinin ortalaması her üç fan hızı için Tablo 3'de verilmiştir. Hava debisi ve ısıl kapasite hesaplamalarında bu değerler kullanılmıştır.

Tablo 3. Testlerden elde edilen verilerin ortalaması.

	Yüksek fan hızı	Orta fan hızı	Düşük fan hızı
Oda havasının kuru termometre sıcaklığı (T_a), [°C]	26,97	27,07	27,01
Oda havasının çiy noktası sıcaklığı (T_{d1}), [°C]	14,70	14,75	14,73
Lüleden geçen havanın kuru termometre sıcaklığı (T_n), [°C]	14,36	14,16	13,98
Lüleden geçen havanın çiy noktası sıcaklığı (T_{d2}), [°C]	12,52	12,33	12,10
Cihaz çıkışında kanal içi statik basınç (P_x), [Pa]	-0,27	0,37	-0,48
Lüle girişinde kanal içi statik basınç (P_n), [Pa]	9,10	8,13	12,36
Lüle basınç kaybı (ΔP), [Pa]	263,81	180,86	84,76
Atmosfer basıncı (P_{atm}), [Pa]	91 284	91 321	91 628
Su giriş sıcaklığı (T_{w1}), [°C]	6,98	7,00	7,01
Su çıkış sıcaklığı (T_{w2}), [°C]	11,99	11,99	12,00
Suyun kütleli debisi (\dot{m}_{w}), [kg/h]	336,8	291	208,3
FC motorunun çektiği güç (P_e), [W]	30	27	22

Önceki bölümde açıklanan hesap metodu kullanılarak bilinmeyen parametreler her üç fan devri için hesaplanmış ve Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Deneysel sonuçlar.

Parametre	Yüksek fan hızı	Orta fan hızı	Düşük fan hızı
Oda havasının nem oranı (W), [$g_{su}/kg_{kuru\ hava}$]	11,61	11,64	11,59
Lüleden geçen havanın nem oranı (W_n), [$g_{su}/kg_{kuru\ hava}$]	10,05	9,92	9,73
Oda havasının özgül hacmi (v), [m^3/kg]	0,9615	0,9615	0,9580
Lüleden geçen havanın özgül hacmi (v_n), [m^3/kg]	0,9187	0,9176	0,9137
Oda havasının viskozitesi (μ), [$Pa.s \times 10^{-6}$]	18,2327	18,2371	18,2349
Lüleden geçen havanın viskozitesi (μ_n), [$Pa.s \times 10^{-6}$]	17,6519	17,6438	17,6376
Lüle boşaltma katsayısı (C_n)	0,9791	0,9773	0,9733
Lüle genleşme faktörü (Y)	0,9984	0,9989	0,9995
Fan-coilin hacimsel hava debisi (\dot{V}), [m^3/h]	370,36	306,51	208,82
Lüleden geçen havanın hacimsel debisi (\dot{V}_n), [m^3/h]	353,35	292	198,77
Fan-coilin kütleli hava debisi (\dot{m}), [kg/h]	385,18	318,77	217,96
Lüleden geçen havanın kütleli debisi (\dot{m}_n), [kg/h]	384,59	318,23	217,56
Fan-coilin kuru hava kütleli debisi (\dot{m}_{da}), [kg/h]	380,76	315,11	215,46
Bataryada yoğuşan suyun kütleli debisi (\dot{m}_{su}), [kg/h]	0,59	0,54	0,40
Hava tarafı soğutma kapasitesi (\dot{Q}_{tot}), [kW]	1,903	1,659	1,200
Su tarafı soğutma kapasitesi (\dot{Q}_{su}), [kW]	1,966	1,692	1,211
FC ünitesinin soğutma kapasitesi (\dot{Q}_e), [kW]	1,9345	1,6755	1,2055
FC ünitesinin duyulur soğutma kapasitesi (\dot{Q}_s), [kW]	1,484	1,281	0,925
FC ünitesinin gizli soğutma kapasitesi (\dot{Q}_l), [kW]	0,450	0,394	0,281
FC ünitesinin duyulur ısı oranı (D.I.O)	0,77	0,76	0,77

Tablo 4'den görüldüğü gibi, su tarafı soğutma kapasitesi hava tarafı soğutma kapasitesinden büyüktür. Bunun sebebi, hava tarafı soğutma kapasitesinden motorun çektiği gücü düşmek ve diğer sebebi ise test sisteminin su hattında su sıcaklığı ölçüm noktalarından sonra yaklaşık bir metre boyunda yalıtılmış fleks su hortumu ve bağlantı ekipmanları mevcuttur ve oda havasından bir miktar ısı su giriş hattında su bataryaya girmeden ve çıkış hattında su bataryadan çıktıktan sonra suya aktarılıyor olmasıdır.

İncelenen fan-coilin kapasitesi, yüksek fan hızında üretici firma tarafından 2,12 kW olarak beyan edilmiştir. Test sonucunda bu kapasite 1,93 kW belirlenmiştir. Bunun nedeni oda hava şartlarının farklı olmasında kaynaklanmaktadır. Üretici firma ünitenin 27 °C, %50 bağıl nem ve deniz seviyesinde (çevre basıncı 101 325 Pa) olan soğutma kapasitesini beyan etmiştir oysaki bu ürün 27 °C, %47 bağıl nem ve denizden yaklaşık 895 m yükseklik seviyesinde olan bir ortamda test edilmiştir. Rakım farkından kaynaklanan kapasite farkı, havanın yoğunluğunun değişiminden kaynaklanmaktadır. Belirli bir devirde fanın hacimsel debisi sabit olduğundan yoğunluk azalınca (deniz seviyesinden yükseklik artınca) fanın kütleli debisi ve dolayısıyla ısı transferi miktarı (kapasite) azalır.

Fan-coilin enerji sınıfını belirlemek için EUROVENT sertifikasyonun hesap metodu sonucunda FCEER parametresi 57,86 olarak hesaplanmıştır ve bu Tablo 2'de verilen bilgilere göre cihazın **D** enerji sınıfında olduğunu göstermektedir. Fan-coil cihazlarında enerji sınıfının düşük olma sebepleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Ünitenin elektrik motorunun (motorlarının) verimsiz olması
- Havanın batarya üzerinde teorik hesaplarda beklendiği kadar homojen olmaması

- Batarya bağlantılarında hava bypass alanlarının varlığı

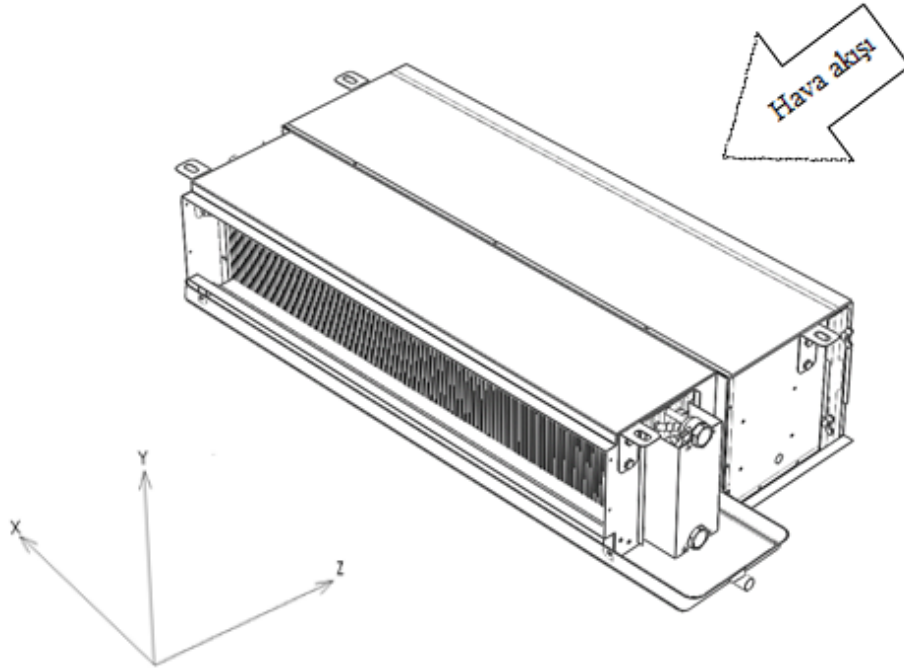
Son zamanlarda AC motorların yerine daha verimli olan elektronik komütasyonlu fırçasız DC motorların (Electronically Commutated Brushless DC Motor) kullanımı ile fan-coil ünitelerde rahatlıkla A veya B enerji sınıfına yükselmek mümkün olmuştur. Ayrıca bu motorların şaftına monte edilmiş fan (fanların), hava debisi değişken olduğundan bir kontrol ünitesi yardımıyla hava şartı ve set değerine göre motorun devri değişerek sistemin enerji verimliliği büyük bir oranda artırabilmektedir.

4. SAYISAL ÇALIŞMA

Fan-coil tasarımında, cihazın kompakt yapıya sahip olması büyük önem taşımaktadır. Cihazın soğutma ve ısıtma kapasitesi, fan motorunun çektiği güce, havanın rahatlıkla ortamdaki emilmesine, havanın batarya yüzeyine homojen bir şekilde yayılmasına ve ortama uygun bir hız ve açıda üflenmesine bağlıdır. Cihazın sessiz çalışması için motor ve fan sesinin düşük olması yanında, hava hızının da düşük olması gerekmektedir. Belirli bir hava debisi olan ünitenin içinde, havanın hızı cihazın farklı kesitlerden geçerken değişmektedir. Bu değişimler özellikle batarya giriş yüzeyinde büyük önem taşımaktadır, çünkü hava batarya yüzeyine ne kadar homojen yayılır ise, batarya verimliliği ve dolayısıyla cihazın performansı artar. Bu yüzden, cihazın tasarımı esnasında, cihazın farklı bölgelerindeki hız dağılımı ve basınç kayıplarının dikkate alınması gerekir. Çalışmanın bu bölümünde, fan-coil içindeki hava akışının hız ve basınç dağılımı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile sayısal olarak incelenmiştir. HAD akış analizleri için Flow Vision HPC sürüm 3.08 yazılımı kullanılmıştır.

4.1. Problemin Tanımı ve Geometrisi

HAD analizi yapabilmek için cihazın 3D modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada daha hızlı ve detaylı model oluşturmak için katı modellemesinde Solid Works 2013 yazılımı kullanılmıştır. Çizim esnasında, ölçüm alması zor olan noktalarda üretici firma tarafından oluşturulan ürünün çeşitli bileşenlerinin teknik çizimlerinden yardım alınmıştır. Şekil 3'de bu çalışma için kullanılan gizli tavan tipi FCnin üç boyutlu çizimi gösterilmiştir. Şekildeki fan-coil, hava giriş bölgesi, filtre, fan ve elektrik motoru, batarya ve çıkış bölgesinden oluşmaktadır. Analizi yapılan fan-coilde bataryanın lamelleri arasındaki mesafe 2,1 mm olup, batarya üzerinde 210 adet lamel (fin) bulunmaktadır.



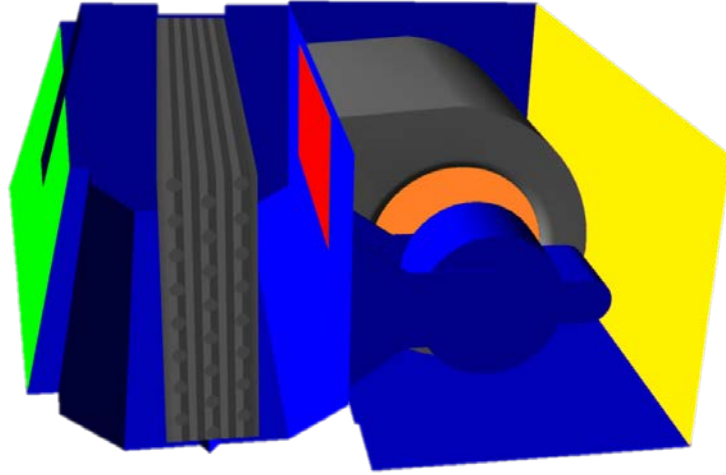
Şekil 3. Fan-coil ünitesinin üç boyutlu çizimi.

Şekil 3’de görüldüğü üzere, nemli hava ortamdan fan vasıtasıyla emilir ve cihazın filtresinden geçirilerek batarya üzerine türbülanslı bir şekilde üflenir. Hava, batarya üzerinde akarken ısı transferi (soğutma/ısıtma), hava ve batarya de dolaşan su arasında gerçekleşir. Daha sonra hava iklimlendirilecek ortama üflenir. Bu süreçte hava farklı kesitlerden geçtiği için hızı değişmektedir ve dolayısıyla basınç değişimine sebep olmaktadır.

Cihazın geometrisi ve ana bileşenlerin cihaz içindeki yerleşimi hız dağılımını ve hava tarafı basınç kayıplarını etkilediğinden cihazın performansı da etkilenir. Özellikle havanın batarya üzerine homojen yayılmaması ısı transferinin etkinliğini ve dolayısıyla cihaz performansını düşürür. Ayrıca sabit debideki havanın cihaz içerisinde uniform dağılmaması bazı bölgelerde hava hızının artmasına ve cihazın ses şiddetinin yükselmesine sebep olur. Cihaz içi basınç kayıpları yüksek olursa, fan hava debisi düşer ve elektrik motorunun devri artar (fan-coil motorlarının devri sabit değildir). Bu yüzden çalışmanın bu bölümünde, FC içerisinde hava akışı sayısal olarak simüle edilerek bu sorunların çözülebilmesi için akış analizleri yapılmıştır.

4.2. Sınır Şartları

Çözüm hacmini detaylandırma işlemi, sistemin giriş, çıkış, duvar ve sınır yüzeylerinin belirlenmesi ile yapılmıştır. Şekil 4.’de problemin üç boyutlu modeli Flow Vision yazılımı ortamında gösterilmiştir. Bu şekilde çözüm hacminin katı sınırları (No Slip duvar) mavi, hava giriş yüzeyi sarı, fan emme yüzeyi turuncu, fan çıkış yüzeyi kırmızı ve fan-coil çıkış yüzeyi ise yeşil renkleri ile boyanmıştır.



Şekil 4. HAD yazılımı ortamında FCnin 3D modeli.

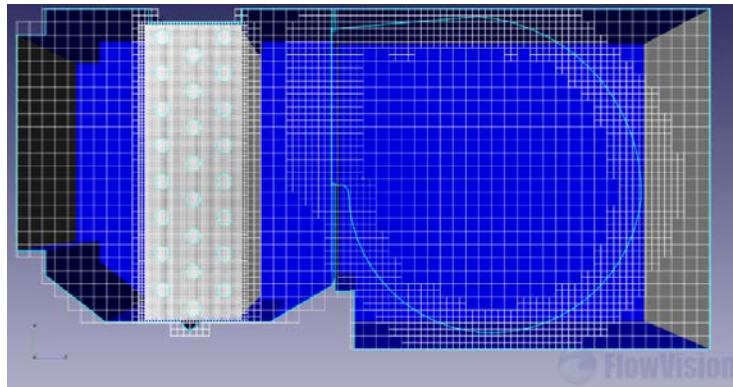
Yüksek, orta ve düşük fan devirlerinde deneysel test şartlarında elde edilen sonuçlar sayısal çalışmalarda girdi olarak kullanılmıştır. HAD yazılımında nemli hava tanımlama özelliği olmadığından test şartındaki kuru termometre sıcaklığı, çevre basıncı ve nem oranına göre nemli havanın yoğunluk ve dinamik viskozitesi hesaplanmış, yazılıma bu yöntemle tanıtılmıştır. Ayrıca, test sonuçlarından elde edilen giriş kütleli hava debisi değerleri yazılıma girilmiştir. Tanımlanan parametrelerin listesi Tablo 5'de verilmiştir.

4.3. Sayısal Çözüm

Sayısal çözümler, Flow Vision HPC Version 3.08 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımın seçilmesinin nedeni, karmaşık geometriye sahip akış hacimlerinde farklı bölgelerde farklı sıklıklarda çözüm ağı oluşturabilmesi ve sıkı sayısal ağı diğer ağlara otomatik olarak adapte edebilmesidir.

Problemin sayısal olarak çözülebilmesi için, önce uygun bir hesaplama ağının oluşturulması gerekir. Kullanılan HAD yazılımının üç boyutlu çizim yapabilme kabiliyeti olmadığı için, CAD (Computer Aided Design) yazılımı Solid Works 2013 ile FCnin üç boyutlu geometrisi oluşturulmuş ve HAD yazılımına çağırılmıştır. Problemin doğru bir şekilde çözülebilmesi için, bataryanın her iki lameli arasında en az 3 ila 5 sayısal ağın olması gerekmektedir. Bundan dolayı, çözüm ağı düğüm noktası sayısı 100 milyon adedin üstüne çıkmaktadır. Yazılımın özelliğini kullanarak, batarya ve fan bölgelerinde sıkı sayısal ağ, diğer bölgelerde ise normal sayısal ağ oluşturulmuştur.

Bu problemi çözmek için, önce bir kaba sayısal ağ oluşturulmuştur, ardından fan emiş ve çıkış bölgelerinde 2'inci düzey ve batarya hacminde 3'üncü düzey sıklıkta sayısal ağ oluşturulmuştur. Kaba sayısal ağın oluşumunda, cihazın x-boyutu (uzunluk) 105, y-boyutu (yükseklik) 26 ve z-boyutu (derinlik) 54 kısma bölünmüştür. Böylece sistemde yaklaşık 9,3 milyon sayısal ağ oluşturulmuştur. Sıkı sayısal ağdan, kaba sayısal ağa uyumlu bir geçiş olması için sayısal ağ adaptasyonu otomatik olarak yazılım tarafından yapılmaktadır. Şekil 5'de sayısal ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5. Sayısal ağ yapısı.

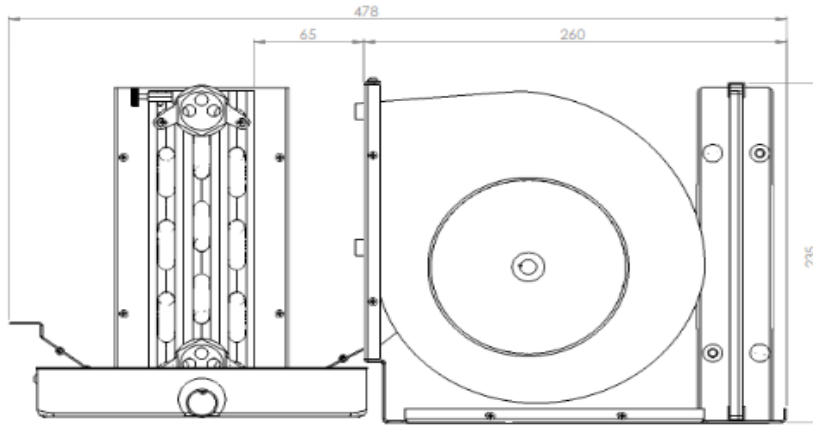
Bu yoğunlukta sayısal ağı oluşturup çözebilmek için de güçlü bir bilgisayara ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan bilgisayarın özellikleri aşağıda verilmiştir.

Bilgisayar Markası	Dell Precision T5500
Ana Kart	Intel 5520
İşlemci	2 x Intel Xeon E5645 (2.40 GHz, 5.86 GT/s, 12 M, 6 C)
İşletim Sistemi	Ubuntu Linux masaüstü sistemi
Bellek	72 GB DDR3 @ 1333 MHz
Sabit Disk	2 x 1TB Serial ATA II (7200 RPM)
Ekran Kartı	2 GB GDDR5 NVIDIA Quadro 4000
Güç Kaynağı	875 W (%85 Power Factor Correcting)

Çözümlerde standart duvar fonksiyonu ve K-Epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Yakınsama hatalarını minimuma düşürmek için yakınsama kriteri 10^{-6} mertebesinde tutulmuştur.

4.5. Sayısal Bulgular ve Tartışmalar

Hava hızının batarya yüzeyindeki dağılımı, fan-coillin performansı için çok önemlidir. Bu nedenle, batarya üzerindeki akışı incelemek için, değişik fan hızlarında sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Batarya-fan çıkış ağızları arasındaki mesafe, batarya üzerindeki akışı etkileyen diğer bir önemli parametredir. Bu parametrenin akışa etkisini analiz edebilmek için, farklı batarya-fan çıkış ağızları mesafeleri için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Fan-coillin ana boyutlarını gösteren çizim Şekil 6'da verilmiştir.

**Şekil 6.** Fan-coil ünitesinin yan görünüşü.

Fanın üç farklı devir sayısı (yüksek, orta, düşük) çalıştığı durum için yapılan simülasyonlarda esas alınan akış parametrelerinin değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Bu değerler, deneysel çalışmalarda elde edilmiş olan değerlerdir. Basınç, sıcaklık, yoğunluk ve kütleli hava debisi değerleri test şartlarındakine eşit alınmıştır. Nemli havanın viskozitesi, Eş. 8 ile 13 kullanılarak hesaplanmıştır.

Simülasyon çalışmalarının birinci aşamasında, geometrik boyutlar sabit tutularak, Tablo 5'de verilen şartlar için sayısal hesaplamalar gerçekleştirilerek farklı fan devirlerinde (debide) akış yapısı incelenmiştir.

Tablo 5. HAD yazılımına tanıtılan parametrelerin değerleri.

Fan devri	Giriş (ortam) Sıcaklığı [K]	Çevre basıncı [Pa]	Girişte yoğunluk [kg/m^3]	Girişte viskozite [Pa.s]	Girişte hava kütleli debisi [kg/s]
Yüksek	300,12	91 284	1,040 011	$1,82 327 \times 10^{-5}$	0,106 991

Orta	300,22	91 321	1,040 018	$1,82\ 436 \times 10^{-5}$	0,088 547
Düşük	300,16	91 628	1,043 805	$1,82\ 349 \times 10^{-5}$	0,060 544

Sayısal Sonuçların Doğrulanması

Sayısal simülasyonlar ile elde edilen sonuçları doğrulamak için batarya giriş yüzeyindeki ortalama hız değeri esas alınmıştır. Batarya giriş hava hızı değeri FRİTERM firmasının batarya seçim yazılımından (Frt-Coils) hesaplanmıştır. Bu yazılım, seçilen bataryanın belirli hava debisi ve iklim şartlarında giriş ve çıkış hız değerini hesaplamaktadır. Testlerde ve dolayısı ile simülasyonlarda kullanılan akış şartlarında bu yazılım yardımıyla batarya yüzeyinde hesaplanan hava giriş ve çıkış hız değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Frt-Coils yazılımından hesaplanan batarya yüzeyinde hava giriş-çıkış hızları.

	Yüksek Devir	Orta Devir	Düşük Devir
Hacimsel hava debisi [m³/h]	370,36	294,21	208,82
Ortalama hava giriş hızı [m/s]	1,12	0,89	0,63
Hava çıkış hızı [m/s]	1,07	0,85	0,6

Sayısal çözümün hata payını hesaplamak için batarya giriş yüzeyinde bir düzlem oluşturulmuştur. O düzlemdeki hava hızının ortalaması, Frt-Coils yazılımından hesaplanan batarya giriş hava hızı ile karşılaştırılmıştır. Bu yazılımın doğruluğu akredite laboratuvarla yapılan çeşitli deneysel testlerin sonucunda EUROVENT tarafından onaylanmıştır. Farklı fan hızları için karşılaştırma sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

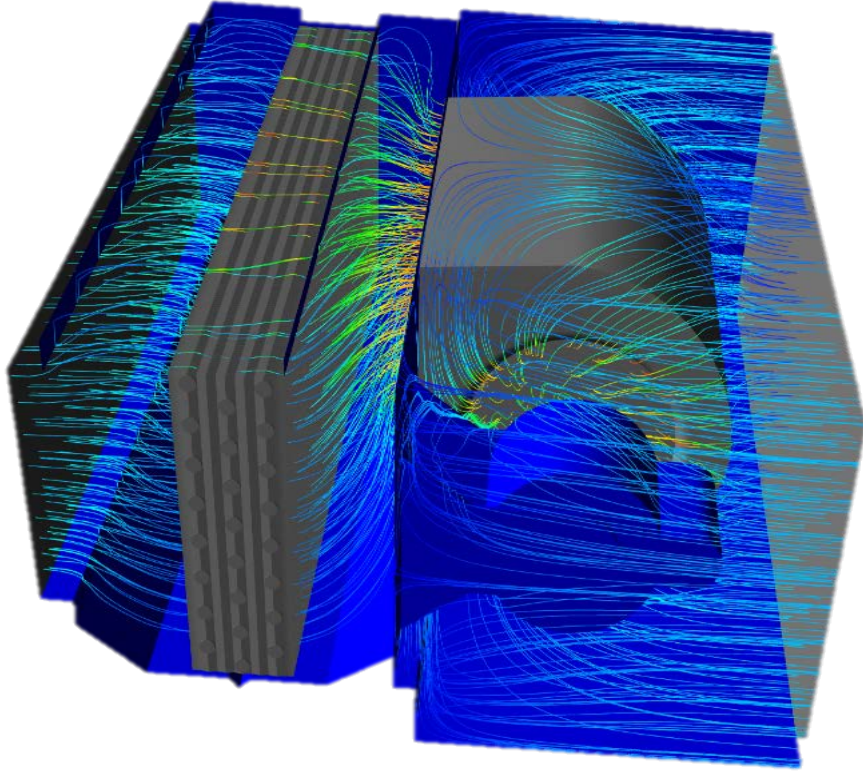
Tablo 7. Sayısal analizlerin hata payları.

	Yüksek fan hızı	Orta fan hızı	Düşük fan hızı
Sayısal sonuç	1,10	0,91	0,62
Frt-Coils hesabı	1,12	0,89	0,63
Fark miktarı	0,02	0,02	0,01
Hata yüzdesi [%]	1,79	2,25	1,59

Yapılan sayısal hesaplamaların hata paylarını kabul edebilir bir oranda olduğunu tespit ettikten sonra her üç fan hızında sonuçları analiz etmek için cihazın ortasında akışa paralel doğrultuda bir düzlem, batarya giriş ve çıkışında bataryaya paralel düzlemler oluşturulmuştur. Bu düzlemlerdeki hız ve basınç dağılımları farklı fan hızlarında grafikler halinde verilmiştir. Bahse konu düzlemlerde sonuçları daha rahat birbirinden ayırt edebilmek için yazılımda hız ve basınç aralıkları özel bir şekilde ayarlanmıştır. Bu aralıklar Tablo 8'de verilmiştir.

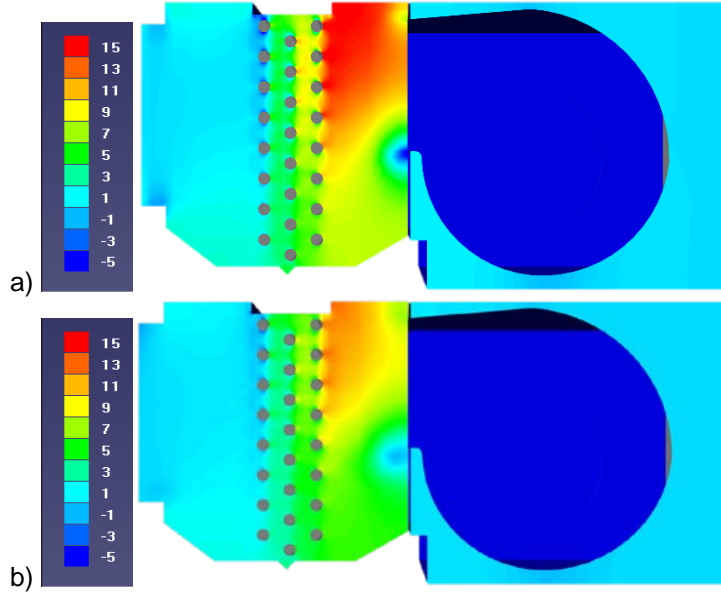
Tablo 8. Sayısal modellerinde ayarlanan hız ve basınç aralıkları

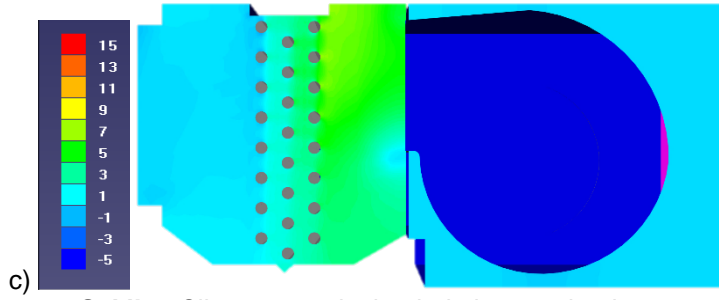
	Orta düzlem	Batarya giriş düzlemi	Batarya çıkış düzlemi
Basınç [Pa]	(-5,15)	(0,15)	(0,2)
Hız [m/s]	(0,5)	(0,3)	(0,3)



Şekil 7. Yüksek fan hızında hava akım çizgileri.

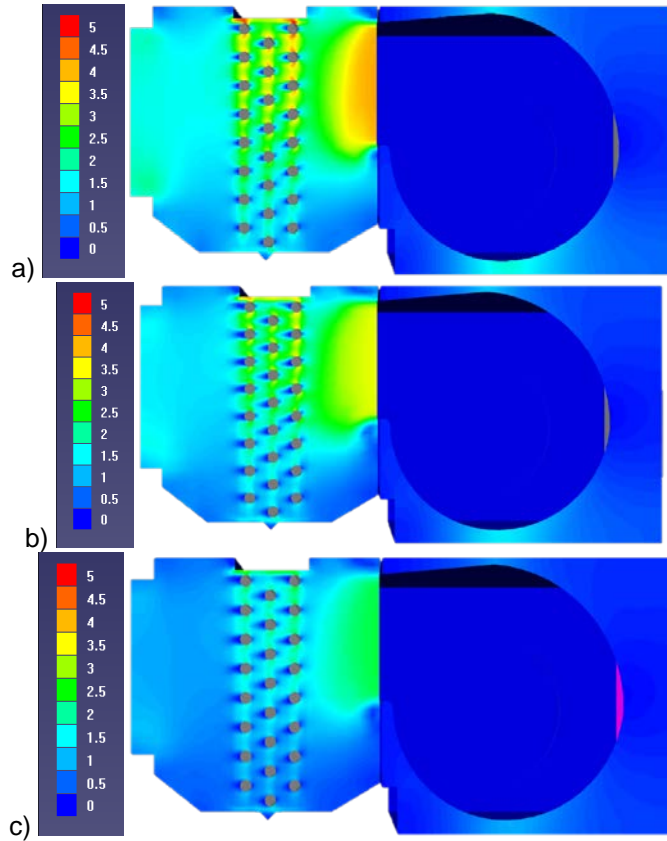
Yüksek fan hızında hava akış çizgileri Şekil 7’de verilmiştir. Akışa paralel ve cihazın ortasından geçen dik düzlemdeki basınç dağılımları Şekil 8’de, hız dağılımları ise Şekil 9’da üç farklı fan (debi) için verilmiştir





Şekil 8. Cihazın orta düzleminde basınç dağılımı.

a)Yüksek fan hızı, b) Orta fan hızı, c) Düşük fan hızı (basınç birimi paskaldır).



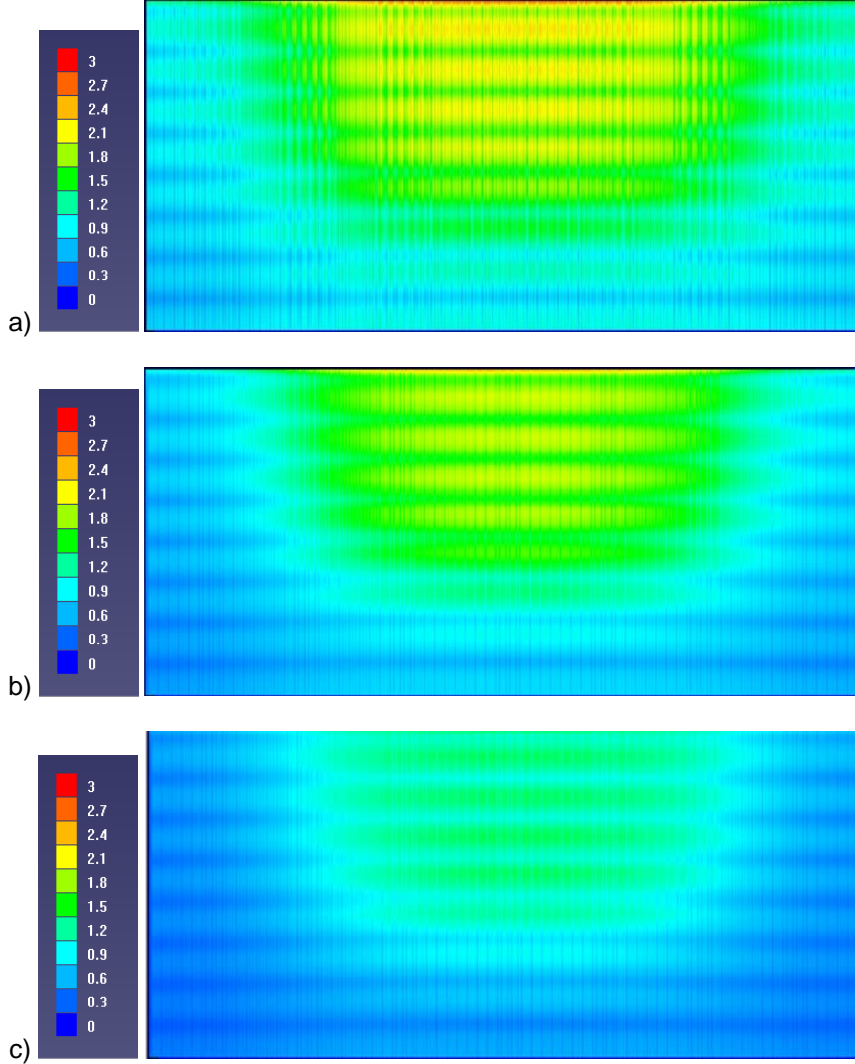
Şekil 9. Cihazın orta düzleminde hız dağılımı.

a) Yüksek fan hızı, b) Orta fan hızı, c) Düşük fan hızı (hız birimi m/s'dir)

FCnin iç hacmindeki basınç dağılımları incelendiğinde, iki farklı bölge görünmektedir. Fanın bulunduğu hacim eksi basınç ve bataryanın bulunduğu hacim ise artı basınçtır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, fan emişinde olan eksi basınç, havanın hareketini bataryaya doğru yönlendirmektedir. Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi, batarya ve fan arasındaki hacmin üst kısmındaki basınç ve hız değerlerinin, bataryanın alt kısmına göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bu, havanın büyük bir oranının bataryanın üst tarafından geçtiğini ifade etmektedir

Yüksek devirdeki hava debisi diğer devirlerden daha büyük olduğu için, batarya öncesi basınç değeri de diğerlerinden daha büyük olmuştur. Batarya giriş yüzeyinde pik basınç değeri yüksek devirde 15,67, orta devirde 11,65 ve düşük devirde 6,65 Pa'dır. Basıncın yükselmesi hava kaçağı ve batarya bypass oranlarının artmasına sebep olur. Batarya yüzeyinde ne kadar homojen bir akış varsa, basınç oluşumu o kadar düşük oranda olur. Dolayısıyla, hava kaçaqları ve bypass oranlarının düşmesi için akışın homojen akışa yakın olması hedeflenmektedir. Ayrıca, batarya yüzeyinde havanın homojen bir şekilde yayılmaması, batarya ısı transfer veriminin düşmesine sebep olur.

Şekil 10'da farklı fan hızlarında batarya giriş yüzeyinde hız dağılımı gösterilmiştir. Bu şekilde hava hızlarının, bataryanın orta ve üst kısmında yüksek olduğu görülmektedir (özellikle yüksek fan devrinde durum daha kritiktir). Bu durumun sebebi fan ile batarya arasındaki mesafeyle ilişkilidir. Mesafe kısaldıkça veya hava debisi arttıkça, hava akışı batarya yüzeyinde belli bir bölgede yığılmaktadır. Bu bölge fanın tam karşısına denk gelen alandır. Hava debisi sabit olduğundan, mesafenin arttırılması akışa daha fazla yayılma zamanı tanıyacaktır. Akışın homojen bir şekilde batarya yüzeyine yayılması, batarya ısı transfer verimi ve dolayısıyla cihazın enerji performansının (COP/EER) artmasına sebep olacaktır.



Şekil 10. Batarya giriş yüzeyinde hız dağılımı.

a)Yüksek fan hızı, b) Orta fan hızı, c) Düşük fan hızı (hız birimi m/s'dir).

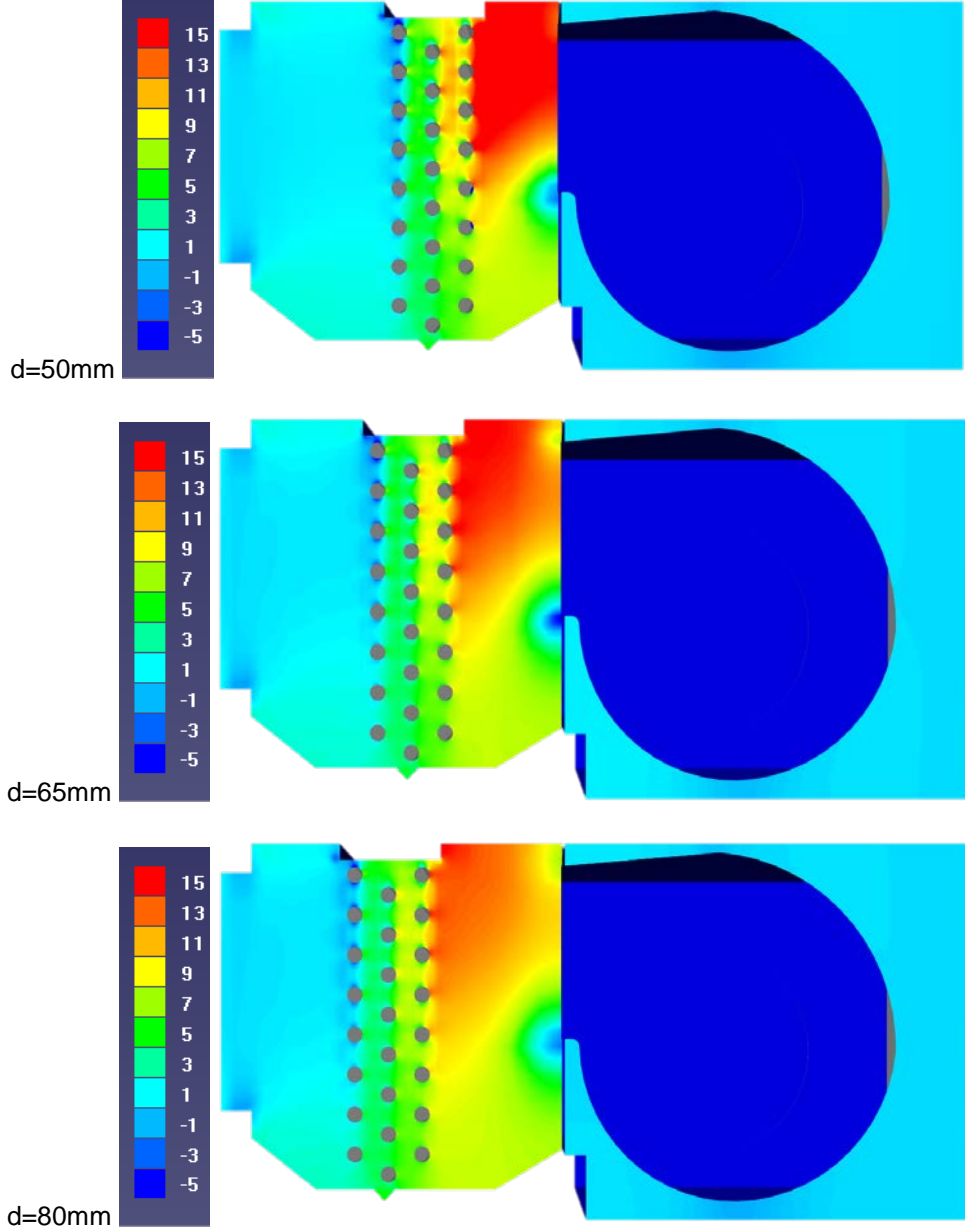
4.6. Batarya-Fan Çıkışı Arasındaki Mesafenin Akışa Etkisinin İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında, fan-batarya arasındaki mesafenin (**d**) değişimi ile hava akışının nasıl etkilendiği HAD yöntemiyle incelenmiştir. Bu analizler sonucunda, fan-batarya arasındaki en uygun mesafe için öngörülebilir bulunmak mümkün olabilmektedir. Analiz edilen FCnin fan-batarya arasındaki mesafe 65 mm'dir. Şekil 6'da FCnin ana boyutları gösterilmiştir. Bu mesafe 15 mm artırıldığında ve azaltıldığında hava akışının nasıl etkilendiği analiz edilmiştir. Bu analizler yüksek fan debisinde yapılmıştır.

Yeni geometriler Solid Works 2013 yazılımında hazırlandıktan sonra Flow Vision yazılımına çağırılmıştır. Bu geometrilerde benzer şekilde kaba ve sıkı sayısal ağ oluşturulmuştur. Her üç

geometrinin sonuçlarını analiz etmek için cihazın ortasında dik olarak, batarya giriş ve çıkışında bataryaya paralel olarak düzlem oluşturulmuştur. Bu düzlemlerdeki hız ve basınç dağılımları farklı fan hızlarında grafikler halinde verilmiştir. Sayısal çözümlerin doğrulaması yine batarya giriş yüzeyin ortalama hız değeri ile yapılmıştır.

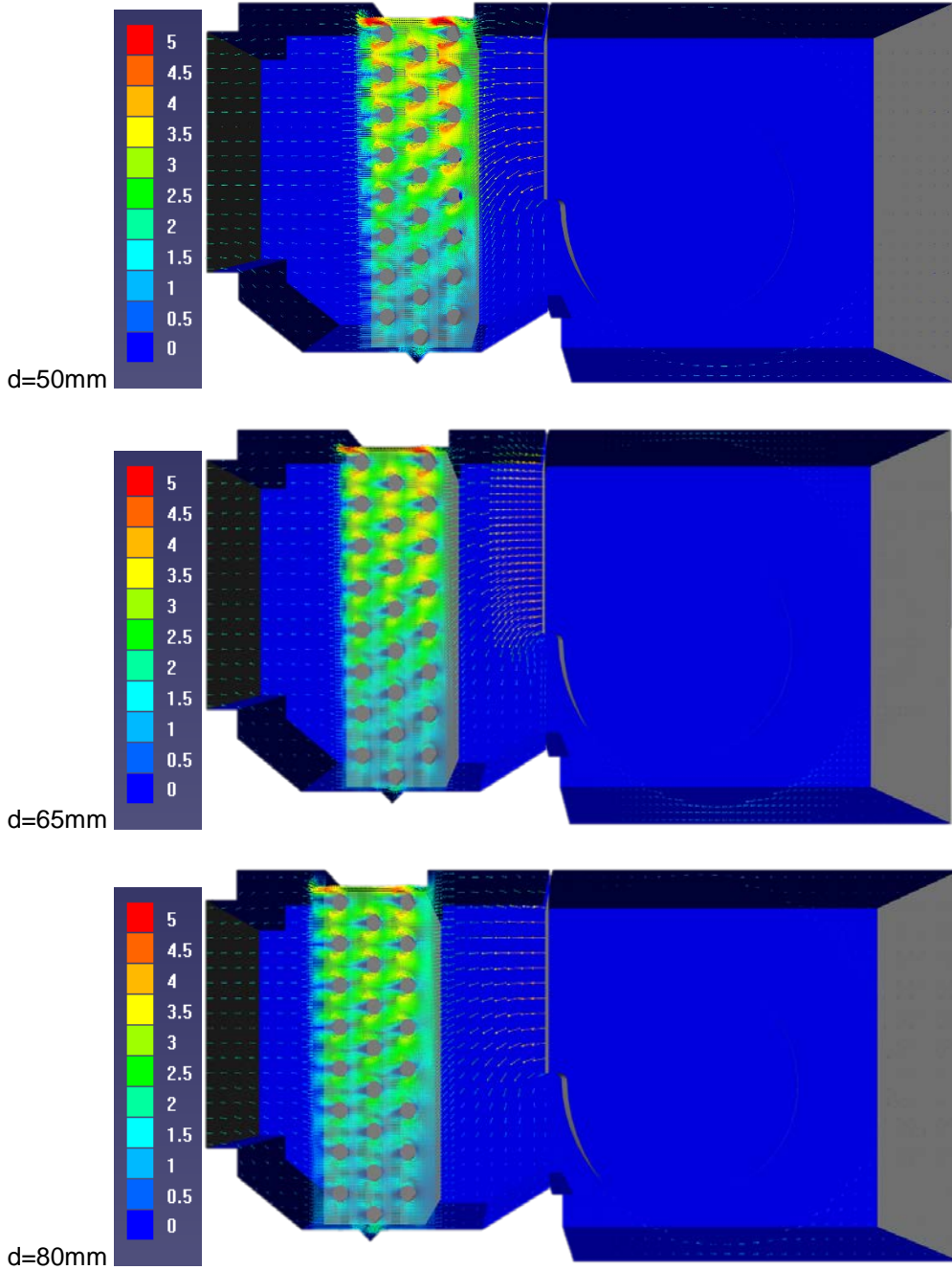
Şekil 11'de görüldüğü gibi, fan-batarya arasındaki mesafe azaldıkça batarya girişinde basınç değerleri artmakta ve mesafe çoğaldıkça basınç değerleri düşmektedir. Yalnız, bu mesafeyi de çok büyük yapmak bu problemin çözümü değildir. Çünkü mesafe uzadıkça hava bataryaya gelmeden kinetik enerjisi (dinamik basıncı) azalacaktır ve cihazın üfleme hava hızı özellikle düşük fan devrinde düşük kalacaktır. Ayrıca cihaz gereksiz yere büyüüp, maliyeti artıp ve kompakt yapısı bozulacaktır.



Şekil 11. Cihazın orta düzleminde basınç dağılımı (farklı d mesafeleri için).

Hız vektörleri sabit bir kesitte akışın yönü ve geçen akışkan miktarını temsil etmektedir. Şekil 11'de farklı fan-batarya mesafelerinde akışın hız vektörleri gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi, d mesafesi 80 mm olan konumda hız vektörlerinin büyüklüğü bataryanın üst bölgesinde küçülüp ve alt bölgesinde büyümektedir. Bu, havanın bataryanın alt bölgesine diğer konumlardan daha çok yayıldığını göstermektedir.

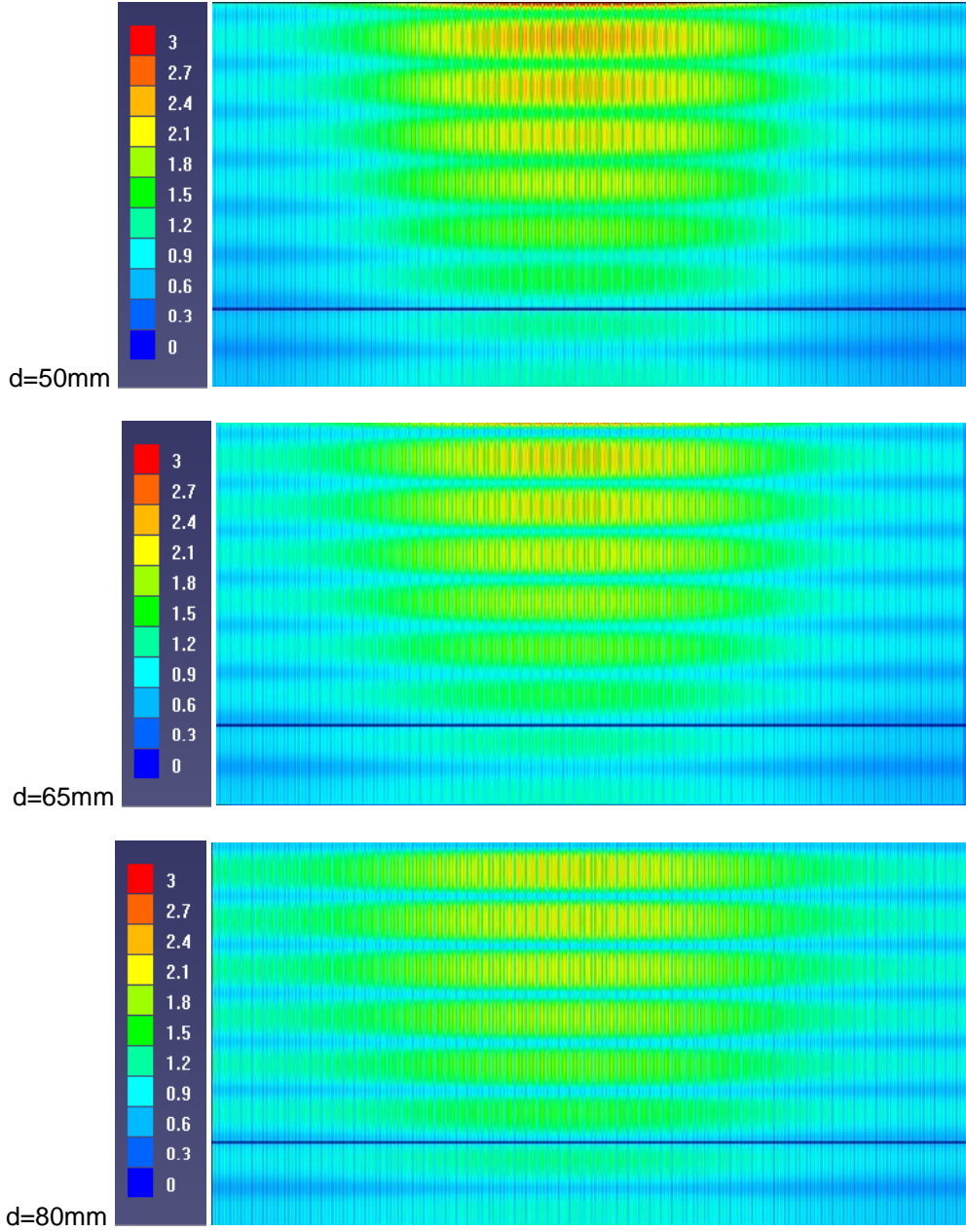
Böylece havanın büyük bir alana yayılabildiğinden, batarya giriş yüzeyinde çok büyük ve çok küçük hız değerleri ile karşılaşılacakla beraber, hem cihazın ses şiddeti azalır hem batarya ısı transfer verimi artır.



Şekil 12. Cihazın orta düzleminde hız vektörlerinin dağılımı (farklı d mesafeleri için).

Batarya üzerinde akışın homojenliği fan-batarya arası mesafelere göre nasıl değiştiğini öğrenebilmek için, bu yüzeyde, farklı fan-batarya arası mesafelerde hız dağılımları Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi, d mesafesi büyüdükçe kırmızı renk tonları bataryanın orta ve üst bölgelerinde azalmakta ve aynı zamanda da yeşil renk tonları bataryanın alt ve kenar bölgelerinde çoğalmaktadır. Bu, havanın daha homojen bir şekilde batarya yüzeyine yayıldığı anlamına gelmektedir.

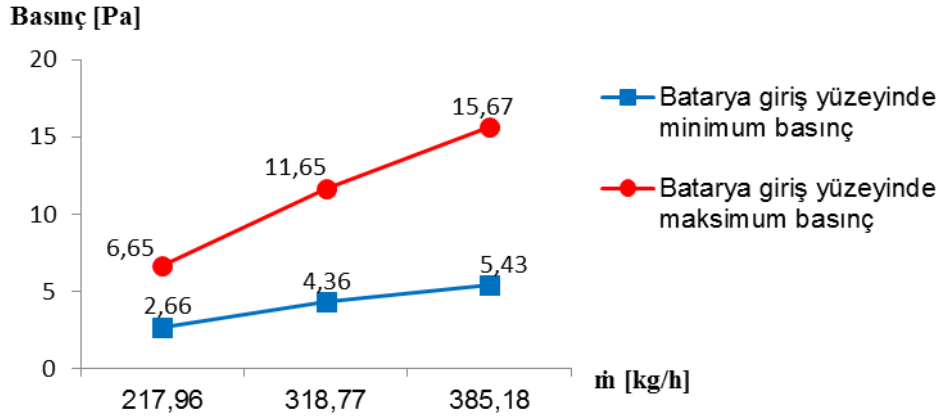
Hava hız değerlerinin ortalama hız değerine yaklaşması, havanın tüm yüzeye eşit bir şekilde yayılmasını ifade etmektedir. Bu yayılma havanın daha fazla bir ısı transfer yüzeyiyle temas etmesine ve ısı transfer miktarının daha fazla olmasına sebep olmaktadır.



Şekil 13. Batarya giriş yüzeyinde hız dağılımı (farklı d mesafeleri için).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

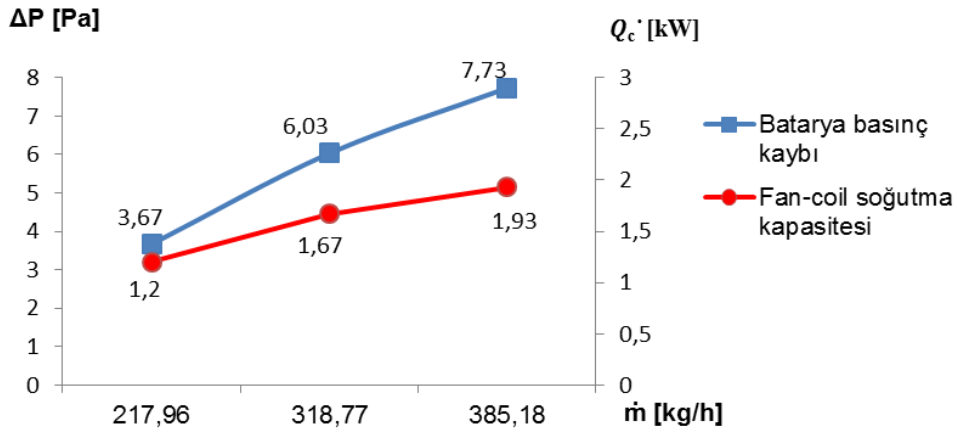
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD, CFD), mühendisler ve bilim adamları için akış analizlerinde, bilgisayar ortamında esnek bir laboratuvar haline gelmiştir. Bu yöntemle karmaşık geometrilere akışın modellenmesi mümkün olmuştur. Bu yöntemin en büyük avantajı, akışı bozmadan istenilen yerde akışın özelliklerinin incelenmesine olanak sağlamasıdır. Bu çalışmada da bu yöntemle FC cihazının akışı farklı fan devir sayıları için analiz edilmiştir. Fan debisi arttıkça bataryanın giriş yüzeyinde basıncın arttığı tespit edilmiştir. Şekil 14'de batarya giriş yüzeyinde farklı fan hızlarında maksimum ve minimum toplam basınç değerlerinin grafiği verilmiştir. Batarya öncesi basınç artışı, cihazın hava kaçağı, ses şiddeti ve bypass oranlarının artmasına sebep olur.



Şekil 14. Farklı fan hızlarında maksimum ve minimum toplam basınç değerlerinin grafiği.

Hava debisinin (fan devir sayısının) artışıyla batarya yüzeyinde, maksimum ve minimum basınç değerlerinin farkı artmaktadır. Bu, batarya yüzeyinde özellikle yüksek devirde havanın batarya yüzeyine homojen bir şekilde yayılmadığını göstermektedir. Bu problem bataryanın ısı transfer verimliliğinin azalması ve cihazın enerji performansının düşmesine sebep olmaktadır.

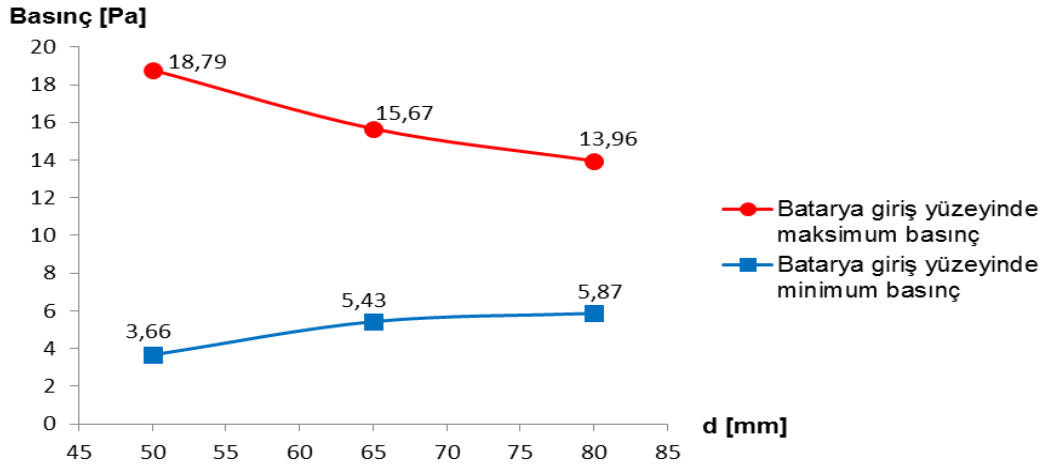
Şekil 15'de farklı fan hızlarında bataryanın basınç kayıpları ve soğutma kapasiteleri verilmiştir. Basınç kaybı değerleri batarya giriş ve çıkış yüzeylerinde, ortalama basınç değerlerinin farkından hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi, hava debisi arttıkça basınç kaybı daha çok artmaktadır. Bunun nedeni basınç kaybının hava debisinin karesi ile orantılı olmasıdır. Ayrıca hava debisi artışıyla FC ünitesinin soğutma kapasitesi artmaktadır.



Şekil 15. Farklı fan hızlarında batarya basınç kaybı ve soğutma kapasitesi.

Farklı devirlerin HAD analizleri sonucunda, yüksek fan devrinin hava akışı diğerlerinden daha kritik olduğu tespit edilmiştir. Bu devirde havanın büyük bir oranı bataryanın orta ve üst kısmından geçmektedir. Sayısal çalışmanın ikinci kısmında fan ve batarya arasındaki mesafeyi değiştirerek akışın nasıl etkilendiği incelenmiştir. d mesafesi 50, 65 (normal) ve 80 mm olan konumların akışı modellenip ve kritik bölgelerde hız ve basınç dağılımları karşılaştırılmıştır. (Bkz. Şekil 11-13)

Şekil 16'da fan-batarya arasındaki mesafenin değişimi, batarya giriş yüzeyinde maksimum ve minimum basınç değerlerinin nasıl etkilendiğini göstermektedir. Bu grafikte görüldüğü gibi d mesafesi arttıkça batarya giriş yüzeyinde maksimum basınç değeri azalır ve minimum basınç değeri artmaktadır. Bu, yüzeyde basınç değerlerinin ortalama basınç değerine yakınlaştığını ve akışın batarya yüzeyine daha homojen bir şekilde yayıldığını göstermektedir. Bu homojen yayılma sonucunda ısı transfer yüzeyi arttığı için, batarya ısı transfer verimi (sistemin enerji verimliliği) ve neticede havadan bataryaya ısı transfer miktarı (kapasite) artacaktır.



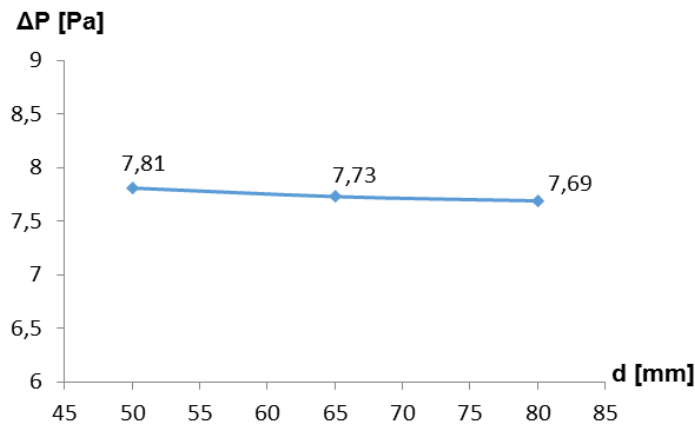
Şekil 16. Farklı d mesafelerinde maksimum ve minimum basınç grafiği.

Batarya basınç farkını hesaplamak için yazılımdan batarya giriş ve çıkış yüzeyinde basınç değerlerinin ortalaması alınmıştır. Her d mesafesi için bu ortalama değerlerin farkı batarya basınç kaybı olarak kabul edilmiştir. Tablo 9'de batarya giriş ve çıkış yüzeyinde ortalama basınç değerleri farklı fan-batarya mesafeleri için tablo halinde verilmiştir.

Tablo 9. Batarya giriş-çıkış yüzeylerinde toplam ortalama basınç değerleri.

	d= 50 mm	d= 65 mm	d= 80 mm
Giriş ortalama toplam basıncı [Pa]	8,44	8,4	8,38
Çıkış ortalama toplam basıncı [Pa]	0,63	0,67	0,69

Farklı d mesafelerinde hesaplanan batarya basınç kayıpları grafik halinde Şekil 17'de verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi, d mesafesinin büyümesiyle basınç kaybı değerleri azalma yönünde hareket etmesine rağmen büyük bir fark hissedilmemiştir. Bunun sebebi, d mesafesinin artması, bataryanın alt kısmından geçen hava miktarının artmasına sebep olmasıdır. Bu bölgeden geçen hava bataryadan çıktıktan sonra cihaz çıkışının eğimli sacına rastlamaktadır. Bu direnç batarya çıkışının alt kısmında basınç artışına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, bu direnç batarya çıkış yüzeyinde ortalama basınç değerinin düşmesine engel olmaktadır.



Şekil 17. Farklı fan-batarya arası mesafelerinde batarya basınç kaybı.

Ünitenin çıkış ağzının alanı büyütülerek veya çıkış ağzını az miktarda aşağıya çekerek bu problemim çözülebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1].Wang, C. Chang, C. T. Heat and mass transfer for plate fin-and-tube heat exchangers, with and without hydrophilic coating. Taiwan: Yuan-Ze University.
- [2].ANSI/AMCA 210 Standard. (1999). Laboratory Methods of Testing Fans for Ratings. Air Movement and Control Association International, INC, 4-50.
- [3].ANSI/ASHRAE Standard 79-2002 (RA 2006). Method of testing for rating Fan-coil conditioners. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2-14.
- [4].Eurovent RS 6/C/002-2017. Rating standard for the certification of non-ducted Fan-coil units. Paris: Eurovent Certita Certification, 4-9.
- [5].ASHRAE Handbook. (2013). Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1-16.
- [6].Morvay, Z. K. Gvozdenac, D. D. Thermodynamic and transport properties of moist air. John Wiley & Sons.
- [7].Türk Standardı TS EN 1397. (2000). Isı değiştiricileri-Isıtıcı soğutucu Fan-coil üniteleri-Performans tayini için test metodları. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- [8].Eurovent 6/3-1996. Thermal test method for Fan-coil units. Paris: Eurovent/Cecomaf.
- [9].Genceli, O. (2000). Ölçme tekniği. İstanbul: Birsen Yayınevi, 23-29.
- [10].Malalasekera, W. Versteeg, H. K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics (second edition). Harlow: Pearson Educated Limited.
- [11].AHRI Standard 440. (2008). Performance rating of room Fan-coils. Arlington: Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Institute.
- [12].Incropera, F. P. Principles of Heat and Mass Transfer (Seventh edition). Hoboken: John Wiley & Sons, 5-66.
- [13].Flow Vision HPC Manual (Version 3.08.03). Belgium: CAPVIDIA (1999-2012).

ÖZGEÇMİŐ

Akbar FIROUZFAR

1987 yılı Oroumieh-İRAN doğumludur. 2009 yılında Urmia Üniversitesinden lisans ve 2014 yılında Gazi Üniversitesinden yüksek lisans derecelerini Makina Mühendislięi Bölümü'nden almıştır. 2010-2011 yılları arasında iş geliştirme uzmanı olarak Shajari Trading & Investment firmasında görev yapmıştır. 2012 yılında sistem yöneticisi olarak Anadolu Plazma Teknoloji Enerji Merkezi firmasında Gazi Teknopark bünyesinde çalışmıştır. 2013 yılından beri Ar-Ge Mühendisi olarak ÜNTES Isıtma Klima Soğutma A.Ő. firmasında çalışmakta olup aynı zamanda da bu firmanın Ar-Ge performans test laboratuvarlarından sorumludur.