

İKLİMLENDİRME ODASININ MATEMATİK MODELİ VE SİMÜLASYONUNUN YAPILMASI

İsa TAŞDELEN^{1,2}

A. Fevzi Baba¹

Hasan ERDAL¹

Ahmet E. KUZUCUOĞLU¹

1- Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Bilgisayar Eğitimi

2- TÜBİTAK M.A.M. Bilişim Teknolojileri Araştırma Enstitüsü

Özet

Bu çalışmada, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Bilgisayar Eğitimi Bölümü Otomatik Kontrol Ana Bilim Dalı Laboratuvarı'nda bulunan iklimlendirme odasının matematik modelinin sayısal simülasyonu yapılmıştır. Çok girişli ve çok çıkışlı bir sistem olan iklimlendirme odasının davranış doğrusal olmayan özelliktedir. Sistem davranışını etkileyen büyüklükler; giriş, çıkış ve dönmüş havası kanallarında bulunan damperlerin konumu, deney odasının sıcaklığı, hava hızı ve nemlendirme değerleridir. Simülasyon çalışmalarında doğrusal olmayan matematik modelin denklemleri sayısal yöntemlerle çözülmüştür. Sistemin simülasyonu, için sayısal çözüm yöntemlerinden Runge-Kutta IV kullanılmıştır.

1-Giriş:

İklimlendirme kapalı hacimlerin sıcaklık, nem, temizlik ve hava hareketini insan sağlığı ve konforuna veya yapılan endüstriyel işleme en uygun seviyede sabit tutmak üzere kapalı hacimlerdeki havanın şartlandırılmasıdır.

İnsan vücudu sıcaklık, havanın bağıl nemi ve hava hızından etkilenmektedir. Özellikle nem değişikliklerinin insan vücudu üzerinde etkileri daha fazladır.

Endüstriyel ortamlarda çoğu malzemenin iletilebilmesi gerekli hava şartlarının sağlanması ile yapılabilmektedir. Özellikle kimya, tekstil, atom vb. ilgili endüstrilerde üretim ortamının havasının şartlandırılmasının önemi çok büyüktür.

Böyle bir fiziksel sistemin matematik modelinin simülasyonunun yapılması, gerçek fiziksel sisteme ihtiyaç duymadan sistem kontrol algoritmalarının simülasyon programı üzerinde geliştirilip test edilmesine imkan sağlar.

Bu çalışmada, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Bilgisayar Bölümü Kontrol Eğitimi Ana Bilim Dalı laboratuvarında bulunan iklimlendirme odasının doğrusal olmayan matematik modelin denklemlerini sayısal yöntemlerle çözüldü ve simülasyon sonuçlarının deney sonuçları ile mukayesesi yapılmıştır.

2-Daha Önceki Çalışmalar:

İnsanların bulunduğu bir odanın konfor şartları, insanların giyim, faaliyet alanları ve havanın termodinamik özellikleri ile belirlenir [1]. İnsanları belirli bir faaliyet seviyesi ve giyim şartı için konfor şartlarını sağlama ve enerji harcamasını en aza indirme probleminde, hava sıcaklığı, hava hızı ve bağıl nem durum değişkenleri olarak seçilir [2].

İş yerleri ve binaların iklimlendirmesi için karmaşık bir sistem olan iklimlendirme odasının

kontrol problemini çözmek için analitik tekniklerden faydalanan bir model KAYA [3] tarafından sunulmuştur.

PARMAKSIZOĞLU [4], KAYA'nın [2] modelini referans alarak havanın geri sirkülasyonunu göz önüne almadan yaptığı çalışmada sistemin kararlılığını göstermiştir.

ÖZNERGİZ[5], PARMAKSIZOĞLU'nun [4] yaptığı çalışmaları referans alarak yaptığı çalışmada, havanın geri sirkülasyonunu göz önüne alarak sistemin kararlılığını denklemlerini çözerek göstermiştir.

AKGÜNEY [6], tarafından Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Enerji Laboratuvarında KAYA'nın [2] modeline sadık kalınarak bir iklimlendirme odası kurulmuş, iklimlendirme odasının kararlılığı simülasyon ile gösterilmiş ve optimum kontrol problemini ele almıştır. ERDAL [7] iklimlendirme odasının sıcaklığı ve bağıl nemi bulmak kontrolör ile oda hava hızını ise PID kontrolör ile kontrol etmiştir.

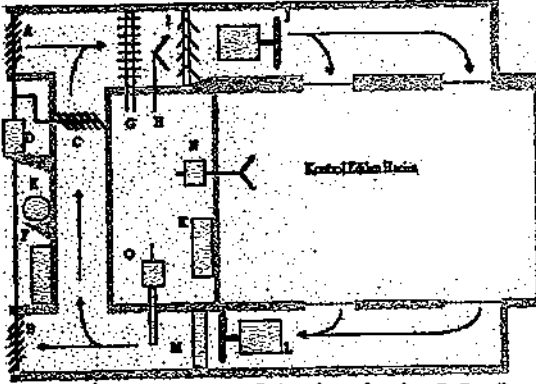
3-İklimlendirme Odası

İklimlendirme odasının kesit görünüşü Şekil-1'de ve oda parametreleri ise Tablo-1'de gösterilmektedir. Oda üzerinde bulunan ana donanımlar ise şunlardır:

Elektrikli ısıtıcı (G), her biri 750 W gücünde 4 adet ısıtıcı elemandan paralel bağlanması ile oluşmuştur.

Nemlendirici eleman (H), su pompası çıkışına bağlanmış ve pompanın sıkıştırdığı suyu ince zerrecikler haline getiren bir başlıktır. Nemlendiricinin maksimum kapasitesi 4 kg/h'tir.

Giriş havası (J) ve çıkış havası fanları (K), 3 fazlı asenkron motorlar tarafından döndürülen kanatlı fanlardır.



Şekil-1 İklimlendirme Odası'nın kesit görünüşü ve sistemde yer alan donanımlar [7].

Tablo-1 Odanın ısı transfer sabitleri.

| | |
|---|---|
| Duvar kalınlığı | $L=0.58 \text{ m}$ |
| Duvar malzemesinin yoğunluğu | $\rho_d=84 \text{ kg/m}^3$ |
| Duvar malzemesinin özgül ısı | $C_d=0.38 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ |
| Duvar malzemesinin ısı iletim katsayısı | $k_d=0.036 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ |
| Odanın yatay kesiti | $A=2 \text{ m}^2$ |
| Odanın hacmi | $V=3.6 \text{ m}^3$ |
| Odanın yalıtılmış yüzey alanı | $S=10.8 \text{ m}^2$ |
| İç yüzey film katsayısı | $h_i=50 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ |
| Dış yüzey film katsayısı | $h_d=30 \text{ kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ |

Nemlendirme suyu pompası (E), tek fazlı, kollektörlü (üniversal) bir alternatif akım motorudur.

Nemlendirme suyu deposu (F), 12 lt. lik bir su tankı. Su deposu ile pompa arasında, basılan su miktarını m^3 cinsinden ölçen mekanik bir su saati mevcuttur.

Taze hava giriş damperi (A) ile egzost havası damperi (B) senkronize çalışmaktadır. Dönüş havası damperi (C), ise taze ve egzost havası damperine göre 180° ters hareket etmektedir.

İklimlendirme odasında kontrol edilen değişkenler olan oda sıcaklığı, bağıl nem ve hava hızı değerlerini okuyabilmek için üç adet sıcaklık-nem algılayıcısı, iki adet hava hızı algılayıcısı sisteme eklenmiştir. Algılayıcıların çıkışları analog formdaki elektriksel işaretlerdir. Sistemde bulunan algılayıcıların özellikleri aşağıda açıklanmıştır [7].

Sıcaklık ve nemi ölçmek için kullanılan algılayıcılar tek üniteye bir araya getirilmiş ve "sıcaklık-nem algılayıcısı" olarak adlandırılmaktadır [7]. İklimlendirme odasında kullanılan sıcaklık-nem algılayıcılarından bir tanesi oda dış ortam sıcaklığını ölçmek için oda dışına, bir diğeri oda içi sıcaklığını ölçmek için oda içerisine yerleştirilmiştir.

Sıcaklık algılayıcısı, elektriksel direnci sıcaklıkla değişen bir elemandır. Sıcaklık algılayıcısının $0-50^\circ\text{C}$ ölçüm aralığı vardır. Sıcaklık algılayıcısının zaman sabiti 20 sn. olarak tesbit edilmiştir [7].

Nem algılayıcısı, elektriksel kapasitesi havanın bağıl nem oranına göre değişen bir elemandır. %10-%90 bağıl nem aralığında ölçüm yapan nem algılayıcısının ölçüm hatası $\pm 5\%$ olmaktadır. Nem algılayıcısının zaman sabiti yaklaşık 20 sn. dir [7].

Oda hava hızının ölçülmesi için, kanal tipi, sıcak tel anemometresi olarak bilinen bir hava hızı algılayıcısı kullanılmıştır [7]. Algılayıcı $0-5 \text{ m/s}$ aralığında çalışmaktadır. Hava hızı algılayıcısı oda hava hızı düşük seviyelerde olduğu için çıkış havası kanalına yerleştirilmiştir.

4-Matematik Model:

Kontrol sistemlerinin incelenmesi matematik metodlarla yapılabilir. Bu yüzden fiziksel sistemlerin matematik modelinin kurulması büyük önem arz etmektedir. Matematik modelin kuruluşunun ilk adımı, gerçek fiziksel sistem yerine, sistemin davranışına etkisinin ihmal edilecek kadar az olacağı tahminine dayanan bazı basitleştirici kabuller yapılarak bir modelin elde edilmesi teşkil eder. Model, sonuçların yeterli yaklaşıklıkta olmasını sağlamak ve sistemin davranışlarındaki karakteristik özellikleri kaybetmemek şartı ile mümkün olduğu kadar basit olmalıdır.

Kontrol edilen sistemde esas unsur havadır. Sistemin sürekli rejim şartlarının tespitinde ve dinamik davranışının karakterize edilmesinde denklemlerde havanın termodinamik özelliklerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışma boyunca [4, 5, 6]'da verilmiş kabullere sadık kalmıştır.

5-Matematik Model Denklemleri:

İnsanların bulunduğu bir odanın konfor şartları, insanların giyim, faaliyet alanları ve havanın termodinamik özellikleri ile belirlenir. İnsanları belirli bir faaliyet seviyesi ve giyim şartı için konfor şartlarını sağlama ve enerji harcamasını en aza indirme probleminde, hava sıcaklığı, hava hızı ve bağıl nem durum değişkenleri olarak seçilir. Buna göre iklimlendirme odasının matematik model denklemleri nem, enerji ve hava hızı denge denklemleri ile modellenebilir.

5.a- Nem Dengesi

İklimlendirme odası kontrol hacmi içerisinde nem emici bir madde olmadığı kabul edildiğinde, sisteme giren havadaki nem miktarı ile sisteme verilen su buharının toplamı, sistemden çıkan havadaki nem miktarı ile kontrol hacmi içerisindeki nem değişimine eşittir. Denklemler düzenlendiğine karşın olması durumunda nem

değişimini veren denklem Dk.1'deki gibi ifade edilir [4, 5, 6, 10].

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{V} \left[\left(C \cdot \dot{m} + (1-r) \frac{\omega_a}{T_a \bar{\omega}_a} \cdot f_e \right) \bar{T} \bar{\omega} + (r \cdot f_e - A \cdot v) (\bar{\omega} - 0,622) \right] \quad (1)$$

5.b- Enerji Dengesi

İklimlendirme odası kontrol hacminde enerji değişimi, ısıtıcıdan sisteme verilen ısı miktarı, nemlendiriciden verilen suyun entalpisi ve sisteme giren havanın entalpisinin toplamından, çıkış havası kanalından çıkan havanın entalpisinin ve oda duvarlarından kaçan enerjinin çıkartılması ile elde edilir. Buna göre enerji dengesi denklemi Dk. 2'de ifade edildiği gibi bulunur [4, 5, 6, 10].

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{(C_h + C_b \cdot \omega) V} \left[\left[(Q - Q_k + m \cdot C_p \cdot T_y) \cdot C + \left((1-r) \frac{1+\omega}{T_a \bar{\omega}_a} \cdot h_a + f_e \right) \frac{\bar{T} \bar{\omega}}{\bar{\omega} + 0,378} + C_h (r \cdot f_e - A \cdot v) (\bar{T} - 273,15) - \left(C \cdot \dot{m} + (1-r) \frac{\omega_a}{T_a \bar{\omega}_a} \cdot f_e \right) \right] \right] \quad (2)$$

5.c- Hız Dengesi

İklimlendirme odasının matematik modelinin çıkartılması sırasında yapılan "kontrol hacmi içerisindeki basınç sabit ve dış şartlardır" kabulünden faydalanarak sisteme giren kuru hava miktarı ile sistemden çıkan kuru hava miktarı arasındaki fark, sıcaklık ve nemin değişen fonksiyonu olarak değişen yoğunluktan dolayı kütle değişimine eşittir. Buna göre hız dengesi denklemi Dk. 3'deki gibi ifade edilir [5].

$$v = \frac{(1-r) f_e}{T_a \bar{\omega}_a A} \bar{T} \bar{\omega} + r \frac{f_e}{A} + \frac{V}{A \bar{T} \bar{\omega}} \left(\bar{\omega} \frac{d\bar{T}}{dt} + \bar{T} \frac{d\bar{\omega}}{dt} \right) \quad (3)$$

5.d- Çevre ile Olan Isı Transferi

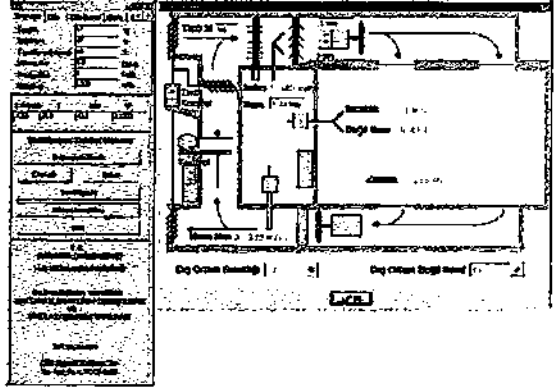
İklimlendirme odasının taban ve tavanının yalıtıldığı kabullerinden yola çıkarak, odanın sadece yan yüzeylerinden olan ısı kaybı Dk. 4'de görülen denklem ile ifade edilmiş olur [4, 5, 7, 10].

$$\frac{dQ_k}{dt} = \frac{T - T_a}{C \cdot R_1 \cdot R_2} + \frac{1}{R_1} \frac{dT}{dt} - \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{C \cdot R_1} \cdot Q_k \quad (4)$$

6-İklimlendirme Odası Simülasyonu:

İklimlendirme odasının matematik modelinin nem dengesi, enerji dengesi ve hava hız dengesi denklemleri doğrusal olmadığı için sayısal çözüm yöntemlerinden Runge-Kutta IV metodu sistemin simülasyonunu yapmak için seçilmiştir. Simülasyon programı için geliştirme ortamı olarak Borland Delphi 5.0 kullanılmıştır. Programın yapısı matematik model üzerine her hangi bir kontrol algoritması eklenebilecek şekilde düzenlenmiştir.

Simülasyon programı ile kullanıcı arasındaki etkileşimi sağlayan program nesnesinin aracılığı ile oda parametreleri, sistem başlangıç şartları kullanıcıdan alınmakta ve simülasyon sonuçları grafiksel, oda üzerinde ve bir tablo halinde olmak üzere toplam 3 ayrı şekilde kullanıcıya sunulmaktadır. Şekil-2'de simülasyon programının ekran görüntüsünü göstermektedir.



Şekil-2 Simülasyon Programı [10]

7-Deney ve Simülasyon Sonuç Eğrileri:

Taze hava damperinin oranı, sisteme giren havanın termodinamik özellikleri, odanın ısıtılmasında ve nemlendirilmesinde belirleyici büyüklüklerdir. Bu nedenle odanın davranışını belirlemek amacıyla yapılan deneylerde taze hava damperinin oranı sistemin temel değişkeni olarak seçilmiştir [7]. Buna göre aşağıda taze hava damperinin %100 açık olduğu duruma göre nemlendirme ve nemlendirmeli olmak üzere çeşitli ısıtıcı güçleri için simülasyon ve deney sonuçları Şekil-3'de verilmiştir.

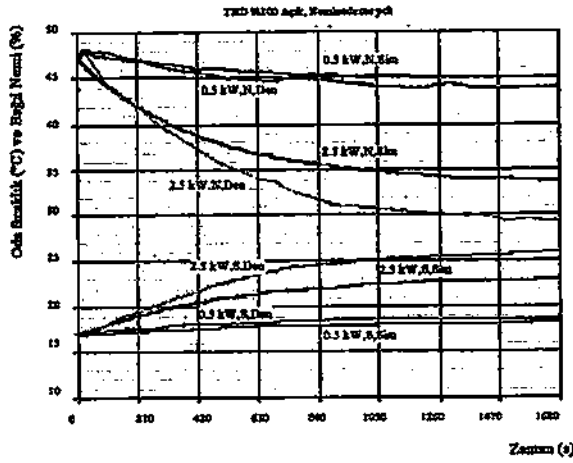
Nemlendirme yok iken yapılan çalışmada; deneysel uygulama sonucunda 0.5 kW/h ısıtıcı gücü çalışmasında sıcaklık 18.5°C'ye ve bağıl nem %44'e ulaşırken, simülasyon sonucunda sıcaklık 18 °C ve bağıl nem %45 olarak tesbit edilmiştir. Benzer şekilde 2.5 kW/h ısıtıcı gücünde deneysel sıcaklık 26 °C ve bağıl nem %29'a ulaşırken, simülasyon sonucunda bu sıcaklık 23 °C ve bağıl nem %34 olduğu tespit edilmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının aynı davranışı gösterdiği görülmüştür.

İkinci uygulamada; iklimlendirme odası başlangıç sıcaklığı 17°C, bağıl nemi %49,

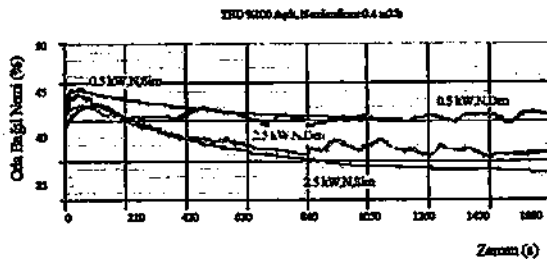
nemlendirme 0.4 m³/h iken, 1 kW/h, 2 kW/h ve 2.5 kW/h ısıtıcı güçlerinde simülasyon programı çalıştırılmıştır. Bu uygulamaya ilişkin nem deney ve simülasyon sonuçları Şekil-4.1'de, sıcaklık sonuçları ise Şekil-4.2.'de verilmiştir.

Simülasyon sonuçlarında görüldüğü gibi nemlendirmenin başlaması ile iklimlendirme odasının bağıl nemi deneysel çalışmadaki davranışa benzer olarak %54 seviyelerine kadar çıkmış, daha sonra ısıtmanın etkisiyle azalmaya başlamış ve %50 seviyelerine kadar düşmüştür.

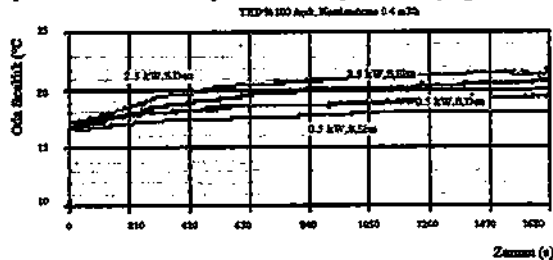
Her iki uygulama için ısıtıcı güçleri karşılaştırıldığında deneysel sonuçlarda olduğu gibi simülasyon sonuçlarında da ısıtıcı gücünün küçük değerlerinde oda nemindeki azalma miktarı daha küçük, ısıtıcı gücünün daha büyük olduğu değerlerde ise oda bağıl nemindeki azalma daha büyük olmaktadır.



Şekil-3 Nem ve Sıcaklık deney ve simülasyon sonuç eğrileri [8]



Şekil-4.1 Nem deney ve simülasyon sonuç eğrileri

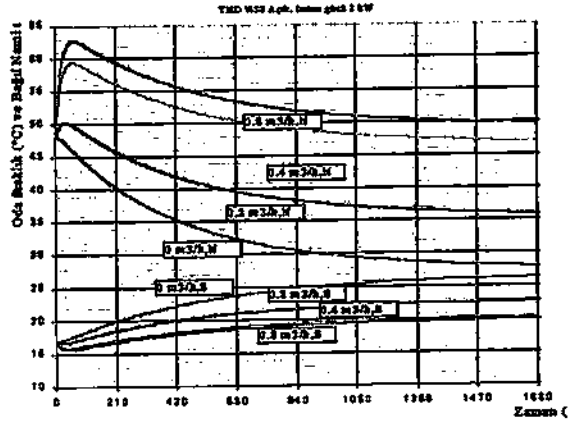


Şekil-4.2 Sıcaklık deney ve simülasyon sonuç eğrileri [8]

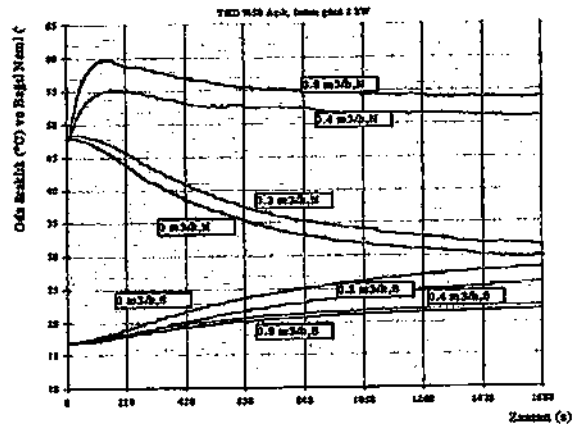
Simülasyonla deneysel sıcaklık ve nem sonuçları benzer davranışlar gösterdiği tespit

edilmiştir. 1 kW/h'lık ısıtıcı gücünde çalışmada deney ve simülasyon nem sonuçlarında %1, 2.5 kW/h'lık ısıtıcı gücünde deney ve simülasyon nem sonuçları arasında %2'lik fark vardır. Her iki ısıtıcı gücü için simülasyon ve deney sıcaklık sonuçları arasında 0.5 °C'lik fark görülmüştür.

Üçüncü uygulamada, oda başlangıç sıcaklığı 17°C, bağıl nemi %48, ısıtıcı gücü 2 kW/h iken, nemlendirmesiz, 0.2 m³/h, 0.4 m³/h ve 0.8 m³/h nemlendirme değerlerinde simülasyon programı çalıştırılmıştır. Bu uygulamaya ilişkin deney ve simülasyon sonuçları Şekil-5.a ve Şekil-5.b'de verilmiştir.



Şekil-5-a Nem ve Sıcaklık deney sonuç eğrileri



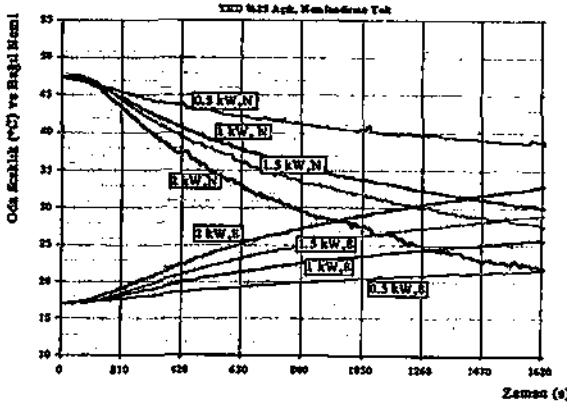
Şekil-5-b Nem ve Sıcaklık simülasyon sonuç eğrileri [8]

Nemlendirmenin ısıtma gücüne, dolayısıyla oda sıcaklığına etkisi hem simülasyon hem deney sonuçlarında görülmüştür. Isıtıcı gücü sabit kalmak şartıyla, yüksek nemlendirme değerlerinde oda sıcaklığındaki artışın yavaşladığı ve ısıtma süresinin uzadığı deney ve simülasyon sonuçlarında görülmüştür. Nemlendirmesiz yapılan deneyde oda sıcaklığının 17 °C'den 28 °C'ye çıktığı, aynı şartlarda yapılan simülasyonda ise oda sıcaklığının 17 °C'den 26.5 °C'ye kadar yükseldiği, oda bağıl neminin deneyde %48'den %30 seviyesine kadar düştüğü simülasyon çalışmasında ise oda bağıl neminin %48'den %28 seviyesine kadar düştüğü görülmüştür. En düşük nemlendirme

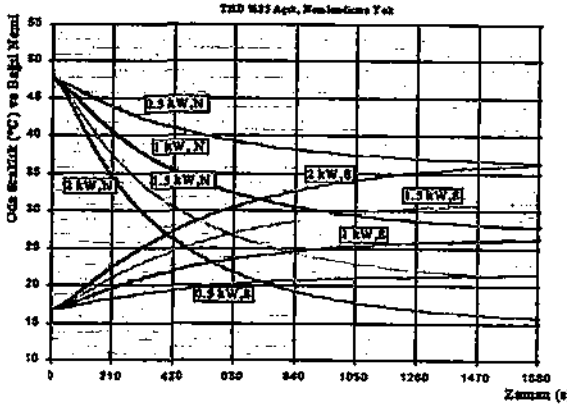
değeri olan 0.2 m³/h nemlendirme değerinde oda sıcaklığı deneyde 26 °C'ye çıktığı simülasyon sonucu ise 23 °C'ye kadar çıkmıştır.

Deney grafikleri ve simülasyon grafiklerinden de görülebileceği gibi oda neminin artış hızı, oda sıcaklığına göre çok daha yüksektir. Özellikle başlangıç anında, ısıtıcı etkisi az olması ve odanın başlangıçtaki nem değerinin düşük olması nedeniyle, oda nem değeri çok hızlı bir biçimde artmaktadır. Bu sonuçlardan simülasyon programı ile oda davranışının benzer olduğu tespit edilmiştir.

Dördüncü uygulamada, oda başlangıç sıcaklığı 17°C, bağıl nemi %47, nemlendirme yok iken, 0.5 kW/h, 1 kW/h, 1.5 kW/h ve 2 kW/h ısıtıcı güçlerine ilişkin deney ve simülasyon sonuçları Şekil-6.6.a ve Şekil-6.6.b'de verilmiştir.



Şekil-6-a Nem ve Sıcaklık deney sonuç eğrileri



Şekil-6-b Nem ve Sıcaklık simülasyon sonuç eğrileri [8]

Taze hava damperinin %25 açıkken yapılmış simülasyon ve deney çalışmalarında, egzost havasının büyük bir kısmının iklimlendirme odasına giren taze hava ile karıştırılıp sisteme verilmesinden dolayı ısıtıcı gücü büyüdükçe oda sıcaklığının aynı sıcaklığa gelme süresi oldukça kısalmıştır. Buna bağlı olarak oda içi bağıl nem değerinin hem simülasyon çalışmalarında hem de deneysel çalışmalarda çok hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Odanın ısıtma süresinde taze hava damperinin diğer konumlarına göre oldukça

kısalmıştır. 2 kW/h'lık ısıtıcı gücünde yapılan deneysel çalışmada oda sıcaklığı 33 °C'ye yükselirken ona nemi %47'den %22 seviyelerine indiği, simülasyon çalışmasında ise oda sıcaklığının 36 °C'ye yükselirken oda neminin de %16'ya indiği görülmüştür.

8-Sonuç:

Sonuçlar incelendiğinde, matematik modelin iklimlendirme odasının davranışını gösterdiği görülmüştür. Oda bağıl neminin ve hava hızının, iklimlendirme odasında olduğu gibi, ısıtıcı gücü ile ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Sistem karakteristiği olarak zaman sabiti gibi davranan iklimlendirme odasının matematik modelinin de aynı karakteristiği gösterdiği simülasyon sonuçlarından görülmüştür.

Simülasyon sonuçları ile deneyler karşılaştırıldığında sıcaklıklarda 1-2°C'lık hatalar bağıl nem değerlerinde ise \pm % 10'lık hatalar gözlemlenmiştir. Bu hatalar, ölçüm için kullanılan algılayıcıların hata oranlarından, matematik model çıkarılınken alınan kabullerden ve odanın inşasında kullanılan duvar malzemelerinin özellikleri standart bir değer olmadığından duvar malzeme parametrelerinin seçiminden kaynaklanmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] ASHRE., Guide Book, Physiological Principles, Comfort and Health, Chapter 7, 1972.

[2] KAYA A., "Modeling of an Environmental Space for Optimum Control of Energy Use", Proceedings of VII th IFAC World Congress, Helsinki, Finland, pp 327-334, June 1978.

[3] KAYA A., "Analytical Methods for Controller Design", ASHRE Journal, April, 1976.

[4] PARMAKSIZOĞLU C., BATUR C., "İklimlendirmede Optimum Kontrol", II. Ulusal Isı Kongresi, syf 106-120, 1979.

[5] ÖZNERGİZ E., "Kapalı Bir Hacimde Sıcaklık ve Nemin Bilgisayarla Optimum Kontrolü", Y. Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1988.

[6] AĞÜNEY Y., "İklimlendirilecek Kapalı Bir Hacimdeki Kontrol Değişkenleri İçin Modelleme ve Simülasyon", Doktora Tezi, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1993.

[7] ERDAL H., "Bir İklimlendirme Odasının Bulunak Mantık Yöntemi İle Kontrolü", Doktora Tezi, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.

[8] TAŞDELEN İ., "İklimlendirme Odasının Matematik Modelinin Çıkarılması ve Simülasyonunun Yapılması", Y. Lisans Tezi, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.