



Nazaroff-Cass Modeli Kullanarak İç Ortam Gaz Kirletici Konsantrasyonunun Tahmini

Prediction of Indoor Pollutant Gas Concentrations by Nazaroff-Cass Model

Nesibe Yalçın^{1,2}, Ahmet Özmen³

¹Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
nesibe.yalcin@bilecik.edu.tr

²Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği A. B. D.
Sakarya Üniversitesi

³Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği Bölümü
Sakarya Üniversitesi
ozmen@sakarya.edu.tr

Özet

Günümüzde insanlar zamanlarının çoğunu iç ortamlarda geçirmektedir. Bu nedenle, insan sağlığını, performansını ve konforunu olumsuz yönde etkileyecek iç ortamda bulunan kirleticilerin varlığı ve miktarı hava kalitesini etkilemektedir. İç ortam hava kalitesini belirlemek ve kirleticilerin dağılımını incelemek amacıyla birçok model geliştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, bir odadaki CO, CO₂, SO₂ gibi iç ortam gaz kirleticilerinin konsantrasyonlarını sıcaklık, nem, basınç ve kirletici kaynaklarının bir fonksiyonu olarak tahmin etmektir. Bu amaçla iç ortam hava kalitesi modellerinden biri olan Nazaroff ve Cass modeli kullanılmıştır. Modelleme yardımıyla filtreleme, havalandırma ve yayılma etkileri açıklanmış ve iç ortamdaki gaz kirleticilerin konsantrasyonları hesaplanmıştır. Çalışmada, ilgili gazların miktarlarını tahmin etmek için MATLAB programlama dili kullanılarak özel bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım yardımıyla havalandırma çeşidine göre gaz kirleticilerin zamana bağlı konsantrasyon değişimleri grafiklerle sunulmuştur.

Abstract

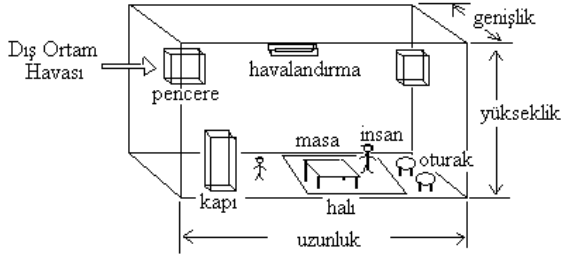
Nowadays people spend most of their time indoors. So, the amount and existence of indoor pollutants that may cause adverse impacts upon human health, performance and comfort affect indoor air quality. Many models have been developed to determine indoor air quality and to analyze the dispersion of the pollutants. In this study, it has been aimed to predict the indoor gasses (such as CO, CO₂, SO₂) pollutants' concentrations as a function of temperature, humidity, pressure and pollutant sources in a room. For this purpose, Nazaroff-Cass model which is one of the indoor air quality models has been used. The effects of filtration, ventilation and dispersion have been described and computed concentrations

of indoor gasses pollutants by modeling. In the study, specific software is developed using MATLAB programming language to predict amounts of the interested gasses. The developed software shows gas pollutants' concentration with respect to time by the graphical outputs.

1. Giriş

Herhangi bir ortamdaki gazların konsantrasyonlarının ölçümü, gaz kromatografisi veya elektronik gaz sensör sistemleri ile yapılabilmektedir. Gaz kromatografisi ile ölçüm oldukça zor ve zahmetlidir. Elektronik sensör sistemleri ise etkin ve daha ekonomik çözümler sunmaktadır. İç ortam hava kalitesi ölçümünün pratik olarak yapılamaması veya ölçüm sistemlerinin maliyetlerinin yüksek olması ortamların matematiksel olarak modellenmesini gerektirmektedir. İç ortam hava kirleticilerinin matematiksel modellenmesi ise günümüzde ilgi çeken ve üzerinde çalışılması teşvik edilen bir konudur. Hava kalitesi modellemede son yıllarda kayda değer bir ilerleme olmasına rağmen hala kalan zorluklar vardır. Modelleme araçlarının daha fazla gelişmesi ve onların gerçek dünya verileri ile doğrulanması, kaynakların daha az tüketilerek en iyi sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır [1].

İç ortamdaki gazların konsantrasyonu, ortamda bulunan kişilerin sayısı, demografik özellikleri ve yaptıkları aktiviteler, ortam içerisindeki kirlilik kaynakları (nemlendirici, deterjanlar), dış ortam gaz kirletici konsantrasyonları, giderler (duvar kağıtları, halılar) ve havalandırma tipi (mekanik, doğal, Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC - Heating Ventilating and Air Conditioning)), meteorolojik parametreler (nem, basınç, sıcaklık) gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörlerin bir kısmı Şekil 1' de modellenmiş bir odada gösterilmiştir.



Şekil 1: İç ortam kalitesi açısından modellenmiş bir ortam

Kabul edilebilir iç hava kalitesinin sağlanması için ortamda bulunan kirleticilerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, Nazaroff-Cass modeli ile bir oturma odası modellenerek simülasyon ortamına aktarılacak ve ortamda bulunan kirletici gazların konsantrasyonlarında meydana gelecek değişimler tahmin edilebilecektir. Böylece, değişimlerin sebebiyet vereceği etkiler öngörülebilecek, gerektiğinde önceden araştırma yapılabilecektir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, iç ortam hava kalitesi modellerinden biri olan Nazaroff-Cass modeli üzerinde durulmuştur. Nazaroff-Cass modeli incelenmiş, modelin özellikleri ve matematiksel formülasyonu verilmiştir. Üçüncü bölümde uygulama detaylandırılmış ve son olarak dördüncü bölümde uygulamanın sonuçlarına yer verilmiştir.

2. Nazaroff-Cass Modeli

İç ortam hava kalitesi modelleri, kütle, momentum ve enerji korunumu yasalarına başvurarak elde edilebilen bir korunum denklemleri setidir [2], [3]. Mevcut iç ortam hava kalitesi modellerini, kullandıkları denklemlerin tipine ya da başvurdukları modelleme yaklaşımına göre makro ve mikro modeller olarak iki temel sınıfa ayırmak mümkündür. Makro modeller, materyal (kütle, miktar) denge denklemine dayanır ve ortamdaki hava karışımının mükemmel olduğunu varsayar. İçerdiği parametrelerin tipi, aralığı ve sayısına (giderler, kaynaklar gibi) bağlı olarak, karmaşıklık ve tahmin yeteneklerinde dikkate değer fark yaratabilirler. Mikro modeller ise Navier-Stokes denklemlerine dayanır ve denklemleri çözmek için sonlu hacim ve sonlu eleman metotları gibi ileri sayısal metotlara ihtiyaç duyulur. Mikro modellerin, tahmin doğruluğu daha iyidir; ancak daha karmaşıktır ve makro modelleme ile karşılaştırıldığında daha fazla hesaplama gücü gerektirir [3].

Bu çalışmada kullanılan bir makro model Nazaroff-Cass tarafından 1986 yılında geliştirilmiştir. Bu model, havalandırma, filtreleme, yüzeylerde birikim, pıhtılaşma ve direkt emisyon etkilerini hesaba katar. Bu modelde, bir bina aralarında hava akışı olan birbirine bağlı bölmeler (odalar) grubu olarak dikkate alınır ve bina içindeki havanın mükemmel karıştığı varsayılır. Bu çalışmada, bir kütle denge yaklaşımına dayanan bu model kullanılarak iç ortam gaz kirletici konsantrasyonlarının tahmini yapılmıştır.

Çok bölmeli bir modelde ($i=1, 2, \dots, N$), tek bir i bölmesi için kütle denge denklemi, (1)'de verilen birinci dereceden bir diferansiyel denklemdir.

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = S_i - L_i C_i \quad (1)$$

Burada V_i , i bölmesinin hacmi; C_i , i bölmesindeki kirletici konsantrasyonu; S_i , i bölmesi içindeki bütün kaynakların toplamı; L_i , bütün giderlerin toplamıdır. Kaynak ve gider parametreleri zamanla değişmektedir.

Her bir kirletici için filtreleme etkinliği, kullanıcı tarafından belirlenebilir. Havalandırma ve filtreleme sistemlerinin etkileri (2) ve (3) denklemleri yardımıyla ifade edilebilir.

$$\frac{dC_i}{dt} = \sum_{j=0}^n \left[\frac{f_{ji} C_j - f_{ij} C_i}{V_i} \right] + \left[\frac{f_{xi} C_x - f_{ix} C_i}{V_i} \right] - \frac{\eta_{if} f_{ii} C_i}{V_i} \quad (2)$$

$$C_x = \frac{\sum_{j=0}^n (1 - \eta_{jx}) f_{jx} C_j}{\sum_{j=0}^n f_{jx}} \quad (3)$$

Burada f_{ij} , i odasından j odasına hava akış oranıdır, η_{ij} , i odasını j odasına bağlanırken hava akışında konumlanmış filtre yardımıyla bileşimin giderme etkinliğidir. x ve 0 alt indisleri sırasıyla mekanik havalandırma sistemi ile dış ortam havasını (atmosferi) betimlemektedir [4].

Sızma (infiltration) oranı f_{i0} , belirli bir zaman periyodu için (4) dile hesaplanabilir. C_0 , t_0 ($t_0 = 0$) zamanında kirleticinin iç ortam başlangıç konsantrasyonunu, C_i , t_e zamanındaki kirletici konsantrasyonunu göstermektedir.

$$f_{i0} = \frac{\ln\left(\frac{C_i}{C_0}\right)}{\Delta t}, \quad \Delta t = t_e - t_0 \quad (4)$$

İç ortam kirletici konsantrasyonunu belirlemede ikinci bir kayıp mekanizması, birikimdir. Yüzeylerdeki kirletici birikim oranı λ_d , birikim hızı v_d ile nitelendirilir ve (5) veya (6) denklemlerinden biri yardımı ile hesaplanabilir.

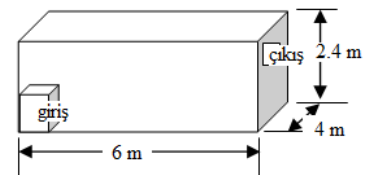
$$\lambda_d = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C_i}\right)}{\Delta t} - f_{i0} \quad (5)$$

$$\lambda_d = \frac{v_d A_d}{V} \quad (6)$$

Burada A_d , birikim için iç ortam temas yüzey alanı ve V binanın hacmidir. Gazların yüzeylerde birikmesi, ortamdaki gaz miktarını azaltıcı etki yapmaktadır. Bu sebeple birikim hızı yüksek olan gazın miktarının, diğer gazlara oranla daha çok azalması beklenir.

3. Uygulama

Bu çalışmada bir oda modellenmiş ve simülasyon ortamına aktarılmıştır. Şekil 2' de odanın boyutları $6 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$ olarak gösterilmiştir. Oda, 1.5 m yüksekliğinde 1 m genişliğinde bir pencereye ve 2.1 m yüksekliğinde 1.2 m genişliğinde bir kapıya sahiptir.



Şekil 2: Odanın şematik gösterimi

Oda havasının mükemmel karıştığı varsayılmış ve tek bir bölme olarak ele alınmıştır. CO, CO₂, SO₂ ve O₃ gaz kirleticileri için hesaplamalar yapılmıştır. Kirleticiler iç ortam kaynakları tarafından üretilmiş ve mekanik ve/ya doğal havalandırma yoluyla giderilmiştir.

Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (U.S. EPA)' ne göre iç ortam sıcaklığı 22.5 °C ile 25.5 °C arasında olmalı ve ortamdaki bağıl nem %70' i aşmamalıdır [2], [5]. Bu çalışmada kullanılan iç ortam gaz kirleticilerinin standart değerleri Çizelge 1' de verilmiştir.

Çizelge 1: Kirletici gazlar için hava kalite standart değerleri [5]

Kirletici	Molekül Ağırlığı (MA)	ppm	mg/m ³
CO	28.01	9	10.332
CO ₂	44.01	1000	1803.689
SO ₂	64.06	70	183.779
O ₃	48	0.05	0.098

25 °C ve 1 atm basınç standartları altında ppm' den mg/m³ e dönüşüm yapmak için (7) denklemi kullanılmaktadır. 24.4 sayısı, molar hacmi gösteren bir dönüşüm sabitidir [7].

$$C_{mg/m^3} = \frac{MA \times C_{ppm}}{24.4} \quad (7)$$

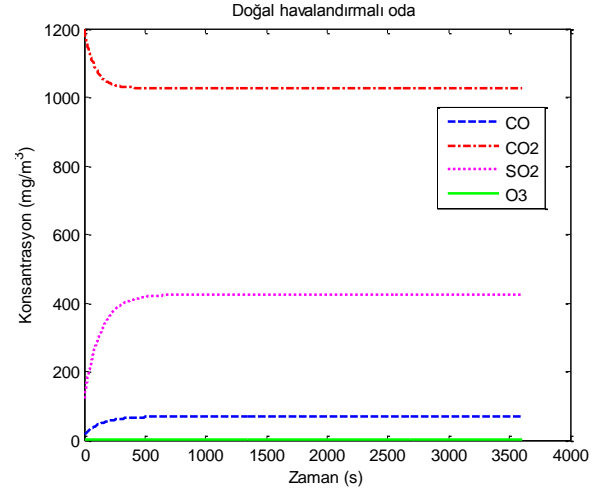
Hava akış oranlarını etkileyen meteorolojik şartlar ve sigara içme, yürüme, temizlik yapma gibi iç ortam aktiviteleri sınırlandırılmıştır. Hava akış hızı ve filtreleme etkinliği ilgili zaman aralığında sabit tutulmuştur. Sınıftaki kimse yoktur. Hava akış oranlarının ve havalandırma etkinliğinin ilgili zaman süresince sabit olduğu varsayılmıştır.

Gaz kirleticilerin birikim hızları literatürdeki çalışmalardan elde edilen değerlere göre belirlenmiştir. SO₂ ve O₃ için 0.036 cm/s, CO için 0 cm/s [8], [9] ve CO₂ için 0.3 cm/s [10], [11]' dir. CO, CO₂, SO₂ ve O₃ gazlarının iç ortam konsantrasyonlarının başlangıç değerleri sırasıyla 15, 1200, 120, 0.05 mg/m³ olarak seçilmiştir. Kirletici atmosfer miktarı sabit tutulmuştur ve CO gazı için 80, CO₂ gazı için 1700, SO₂ gazı için 200 ve O₃ gazı için 0.1 mg/m³ tür.

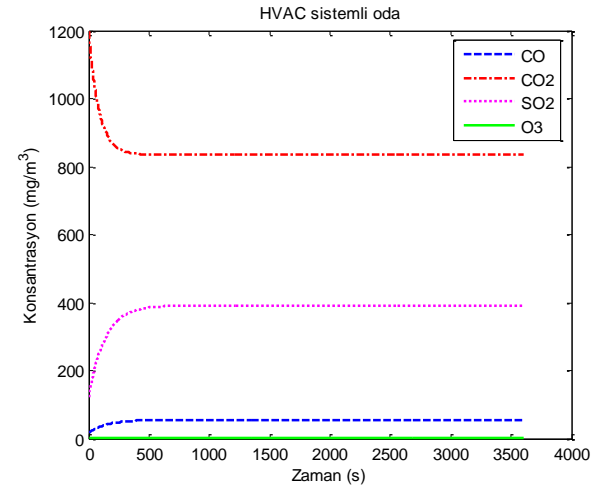
Nazaroff-Cass yaklaşımıyla modellenen örnek oda, daha sonra MATLAB ortamında programlanmış ve çalıştırılmıştır. Odadaki gazların tahmini için belirlenen işlem süresi olarak 1 saatlik bir zaman dilimi belirlenmiş ve ilgilenilen gazlarının değerleri grafik olarak çizdirilmiştir. Kirleticilerin üretim hızları, bu süre boyunca sabit tutulmuştur. CO, CO₂, SO₂ ve O₃ gazlarının üretim hızları sırasıyla 2, 150, 120, 0.1 mg/s olarak seçilmiştir.

HVAC sistemli ve doğal havalandırmalı bir oda için geliştirilen modeller, Intel (R) Core (TM) i7-2600 CPU, @ 3.40 GHz, 8GB RAM donanımlı, 64 bit işletim sistemine sahip bir masaüstü bilgisayarda çalıştırılmıştır.

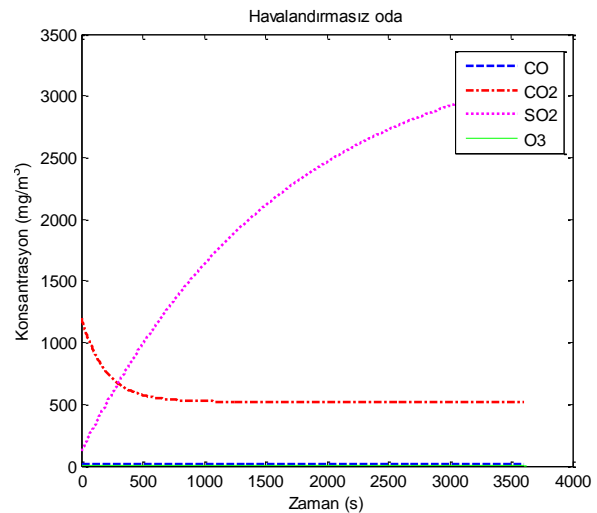
Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5' te sırasıyla doğal havalandırmalı, HVAC sistemli ve havalandırmasız bir odadaki iç ortam gaz kirletici konsantrasyonlarının programdan elde edilen zamana bağlı değişim grafikleri verilmiştir. Modellerin ortalama icrası sırasıyla 0.1470, 0.1494 ve 0.1429 s sürmüştür.



Şekil 3: Doğal havalandırmalı odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonları



Şekil 4: HVAC sistemli odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonlarının değişimi



Şekil 5: Havalandırmasız odadaki iç ortam gaz kirleticilerin konsantrasyonlarının değişimi

HVAC sistemi kullanılarak havalandırılan bir odadaki gazların kararlı durum (steady-state) ya da final konsantrasyonları CO için 54.96, CO₂ için 835.2616, SO₂ için 391.1082 ve O₃ için 0.2876 mg/m³ olarak hesaplanmıştır. Kararlı duruma erişmek için CO₂ gazının konsantrasyonunun azaldığı, CO ve SO₂ gazlarının konsantrasyonlarının arttığı ve O₃ gazının ise miktarının çok az değiştiği Şekil 4' ten görülmektedir.

Doğal havalandırılmalı bir odadaki CO, CO₂, SO₂ ve O₃ gazlarının final konsantrasyonları ise sırasıyla 69, 1026.7183, 424.8316 ve 0.3048 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, HVAC sistemle havalandırmanın, pencere ve kapıların açılarak yapılan havalandırılmaya göre kirletici miktarlarını daha düşük seviyelere getirdiğini göstermektedir.

Havalandırmasız (iç ortama herhangi bir hava akışı olmayan) bir oda modelinde; en yüksek birikim hızına sahip olan CO₂ gazının miktarının diğer gazlara oranla daha çok azalması ve diğer iki modelle karşılaştırıldığında dış ortamdan hava akışı olmadığı için diğer modellerin çalıştırılması sonucu elde edilenden daha düşük bir konsantrasyona sahip olması beklenmektedir. Şekil 5' teki azalan grafik bu beklentiyi doğrulamıştır. Odanın iç ortam konsantrasyonu, ortamdaki gazların üretim ve birikim hızları dikkate alındığında SO₂' in üretim hızı, birikim hızından daha yüksek olduğu için artan bir grafik göstermiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada iç ortam havasında bulunan gaz kirleticilerinin konsantrasyonlarını tahmin etmek için kullanılan Nazaroff-Cass modeli açıklanmış ve formülasyonu verilmiştir. Doğal ve mekanik havalandırılmalı bir odadaki kirleticilerin konsantrasyonları hesaplanmış ve zamana bağlı değişimi incelenmiştir.

Geliştirilen model yardımıyla hem daha az kaynak tüketilecek hem de ortamın yapısı ve ortamda bulunan gazların konsantrasyonları belirlenerek ortamdaki değişiklikler izlenebilecek, etkileri önceden kestirilebilecek ve hava akışları analiz edilebilecektir. Böylece iç ortam hava kalitesi problemleri ve HVAC sistemleri değerlendirilebilir.

Bir sonraki çalışmada iç ortam aktiviteleri modele eklenerek ortamdaki gazların konsantrasyonları üzerindeki etkileri incelenecektir.

5. Kaynaklar

- [1] Morawska, L. ve Congrong, H., (Morawska, L. ve Salthammer, T. (Eds.)), "Particle Concentration Levels and Size Distribution Characteristics in Residential and Non-Industrial Workplace Environments", in *Indoor Environment – Airborne Particles and Settled Dust*, Wiley-VCH, 190-225, 2003.
- [2] Demokritou, P., (Spengler, J.; Samet, J.; McCarthy, J. (Eds.)), *Modeling IAQ and Building Dynamics*, *Indoor Air Quality Handbook*, McGraw-Hill, New York, 57.1–11, 2000.
- [3] Morawska, L. ve Salthammer, T., *Indoor Environment – Airborne Particles and Settled Dust*, Wiley-VCH, 2003.
- [4] Nazaroff, W. ve Cass, G., "Mathematical Modeling of Indoor Aerosol Dynamics", *Environmental Science and Technology*, 1989, 23, 157–166.

- [5] U.S. EPA, *Introduction to Indoor Air Quality – A Reference Manual*, 1991.
- [6] Yurtseven, E., "İki Farklı Coğrafi Bölgedeki İlköğretim Okullarında İç Ortam Havasının İnsan Sağlığına Etkileri Yönünden Değerlendirilmesi", PhD Thesis, Institute of Health Sciences of Istanbul University, İstanbul, 2007.
- [7] Safe Work Australia, *Guidance on the Interpretation of Workplace Exposure Standards for Airborne Contaminants*, 2012.
- [8] Sarwar, G., Corsi, R., Kimura, Y., Allen, D. ve Wescler, C., "Hydroxyl Radicals in Indoor Environments", *Atmospheric Environment*, 2002, 36, 3973-3988.
- [9] Carslaw, N., "A New Detailed Chemical Model for Indoor Air Pollution", *Atmospheric Environment*, 2007, 41, 1164-1179.
- [10] Sehmel, G., "Particle and Gas Dry Deposition: A Review", *Atmos. Environ.*, 1980, 14, 983.
- [11] Zannetti, P., Chapter 6: Eulerian Dispersion Models, *Air Pollution Modeling*, 1990, 107-139.