



**Bu bir MMO
yayıdır**

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

ODA İÇİ PARTİKÜL DAĞILIMININ LAGRANGE YAKLAŞIMINA GÖRE SAYISAL SİMÜLASYONU

**YUNUS EMRE ÇETİN
ORHAN AYDIN
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

ODA İÇİ PARTİKÜL DAĞILIMININ LAGRANGE YAKLAŞIMINA GÖRE SAYISAL SİMÜLASYONU

Numerical Simulation of Indoor Particle Dispersion with Lagrange Approach

Yunus Emre ÇETİN
Orhan AYDIN

ÖZET

İç hava kalitesi, hava hızı, sıcaklığı ve nem değerinin yanı sıra ortamdaki kirleticilerin konsantrasyonuna da bağlıdır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak partikül dağılımının belirlenmesinde iki farklı yaklaşım uygulanmaktadır: Euler ve Lagrange yaklaşımları. Bu çalışmada, Lagrange yaklaşımı için önemli parametrelere değinilmiş ve model bir odada partikül dağılımı incelenmiştir. Elde edilen hız profilleri ve partikül konsantrasyon değerlerinin literatür ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Partikül dağılımı, Lagrange yaklaşımı, Ayırık Faz Modeli

ABSTRACT

Indoor air quality (IAQ) depends concentration of the indoor contaminants as well as air flow velocity, temperature and humidity. There are two approaches for the determination of particulate dispersion in Computational Fluid Dynamics (CFD): Eulerian and Lagrangian. In this study, important parameters of the Lagrange approach are addressed and the particle distribution in a model room is investigated. Obtained velocity profiles and particle concentration values agreed well with in the literature.

Key Words: Particle dispersion, Lagrange approach, Discrete Phase Modeling

1. GİRİŞ

İç hava kalitesi, insan sağlığı ve farklı imalat süreçleri için önemlidir. İlaç, gıda ve elektronik cihaz üretim alanları, biyoteknoloji sahaları ve ameliyathaneler gibi kontrollü alanlarda, kirletici konsantrasyonu, iç hava kalitesini etkiler.

Havada bulunan partiküllerin ortak adı aerosoldur. Aerosol en basit ifadeyle gaz içinde dağınık halde bulunan sıvı veya katı partikül sistemidir. Gaz ve bu gazın içinde dağınık halde bulunan partiküllerden oluşan sistemler, iki fazlı sistemler olarak değerlendirilir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak iki fazlı akış problemlerinde ikincil fazın modellenmesi için iki farklı yaklaşım tercih edilebilir: Euler ve Lagrange yaklaşımları. Euler yaklaşımında, fazların etkileşim halinde oldukları değerlendirilir. Yapısal olarak benzeyen korunum denklemleri her bir faz için ayrı ayrı ele alınır ve bu denklemlerin ilişkilendirilmesi gerekir. Lagrange yaklaşımı ise akış alanı içerisindeki her bir partikülün ayrı ayrı takibine dayanmaktadır.

Ansys Fluent yazılımında kullanılan ayırık faz modeli (Discrete phase modeling – DPM), Lagrange yaklaşımını esas almaktadır. Bu yaklaşımda, sürekli faz içindeki partiküller Lagrange yaklaşımıyla

modellenirken sürekli ya da taşıyıcı faz olan hava Euler yaklaşımıyla modellenir. Sürekli faz için zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemleri çözülürken, sürekli faz içinde hareket eden partiküller hesaplanmış akış alanı içerisinde izlenir. Bu partiküller, sürekli faz ile momentum, kütle veya enerji transferinde bulunabilirler.

Ansys Fluent HAD yazılımında bulunan DPM modeli, ikincil fazın kendi içerisinde etkileşimlerinin ihmal edilebilir düzeyde ve bu fazın hacimsel olarak birincil faza oranla daha az (birincil fazın en fazla %10-12' si kadar) olduğu durumlarda tercih edilir.

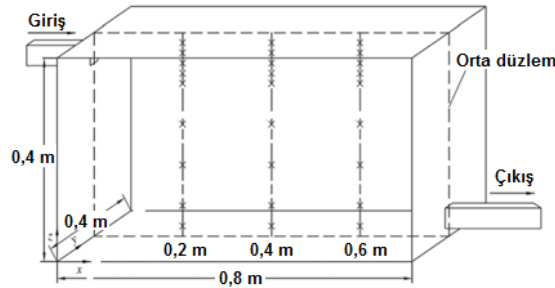
Mahal içi partikül dağılımını Euler veya Lagrange yöntemleri ile değerlendiren farklı çalışmalar bulunmaktadır [1-6]. Bu çalışmada, partikül dağılımının deneysel olarak ve ayrıca Euler yöntemiyle incelendiği literatürdeki bir çalışma [7] Lagrange metodu ile ele alınarak model oda içerisindeki hız ve konsantrasyon değerleri karşılaştırılmıştır.

2. MODELLEME VE ÇÖZÜM YÖNTEMİ

2.1 GEOMETRİ

İlgili deneysel çalışma [7], Şekil 1' de görülen Boy (x) x En (y) x Yükseklik (z) = 0,8 m x 0,4 m x 0,4 m boyutlarındaki bir model oda üzerinde yürütülmüştür. Model odadaki giriş ve çıkış menfezleri 0,04 m x 0,04 m ebatlarında olup orta düzleme simetrik olarak yerleştirilmiştir. Çalışma, hava değişim katsayısı 10 ve 20 değerlerini karşılayacak şekilde sırasıyla 0,225 m/s ve 0,45 m/s üfleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Ortalama 10 µm çapında ve 1400 kg/m³ yoğunluğundaki küresel parçacıklar üfleme havası ile ortama verilmiştir.

Hava hızı ve partikül konsantrasyon değerleri, üç farklı istasyonda (x=0,2 m - 0,4 m - 0,6 m) bir PDA (Phase Doppler Anemometer) sistemi kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 1. Oda geometrisi, menfez konumları ve ölçüm noktaları [7]

2.2 HAVA AKIŞININ MODELLENMESİ

Sayısal analizde hava akışını modellemek için Euler yaklaşımıyla ifade edilen süreklilik, momentum ve enerji denklemleri genel formda aşağıda verilmektedir.

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t}}_{\text{Zaman bağımlı}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\underbrace{\rho u_i}_{\text{Konvektif terim}} - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right] = S_{\phi_k} \quad k = 1, \dots, N \quad (1)$$

Burada, ϕ_k genel değişken olup, süreklilik denkleminde 1, momentum denkleminde u, v, w ve enerji denkleminde ise T olmaktadır. Γ_k difüzyon katsayısı, S_{ϕ_k} ise kaynak terimidir. Çalışmada kullanılacak olan süreklilik ve momentum denklemlerine ait değişken, difüzyon katsayısı ve kaynak terim Tablo 1' de verilmiştir. Sistem izotermal olduğu için; çalışmada, enerji denklemi çözülmemiştir.

Tablo 1. Süreklilik ve momentum denklemlerine ait değişken, difüzyon katsayısı ve kaynak terimler

Denklem	ϕ_k	Γ_k	S_{ϕ_k}
Süreklilik Denklemi	1	-	-
u Momentum Denklemi	u	μ	$-\partial p/\partial x$
v Momentum Denklemi	v	μ	$-\partial p/\partial y$

Türbülanslı akış problemleri için bu eşitliklerdeki hız ve basınç değerlerini ortalama ve çalkantı bileşenleri cinsinden ifade etmek gerekir. Bu durumda, ortaya çıkacak türbülans Reynolds gerilmelerini temsil eden $(\rho \overline{u_i u_j})$ teriminin açık formda yazılabilmesi için bir çok türbülans modeli bulunmaktadır.

Bu çalışmada, RNG k- ϵ türbülans modeli [8] kullanılmıştır. Bu modelin iç hava akışı problemleri için en uygun türbülans modeli olduğu literatürde [9] ifade edilmektedir. RNG k- ϵ türbülans modeli, Navier-Stokes denklemlerinin “renormalisation group (RNG)” metodu olarak bilinen bir matematiksel teknikle çözülmesiyle elde edilmiştir. RNG k- ϵ türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yutulma oranı (ϵ) transport denklemleri ile şu şekilde ifade edilir:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + c_\mu \frac{\eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (4)$$

Denklemlerde yer alan μ_T , türbülans viskozitesi şu şekilde ifade edilir:

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

Model sabitleri RNG k- ϵ modelinde analitik olarak $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$ şeklinde belirlenmişlerdir.

2.3 PARTİKÜL HAREKETİNİN MODELLENMESİ

Lagrange yaklaşımı zamana bağlı momentum denkleminin her partikül için ele alınmasını gerektirir. İlgili denklem şu şekilde ifade edilebilir:

$$\underbrace{\frac{d \vec{u}_p}{dt}}_{\text{zaman bağımlı}} = \underbrace{F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)}_{\text{sürüklemekuvveti}} + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_a \quad (6)$$

Denklemin sol tarafı atalet kuvvetini, \vec{u}_p partikülün hız vektörünü ifade etmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk kısım sürükleme terimi olarak bilinir ve burada F_D gevşeme zamanının tersini (s^{-1}) ve \vec{u} hava hızını temsil etmektedir. Aynı denklemden ikinci terim yer çekimi ve ısı etkisi ile ortaya çıkan kaldırma kuvvetini temsil eder, burada ρ ve ρ_p sırasıyla havanın ve partikülün yoğunluğunu göstermektedir.

Sağ kısımdaki \vec{F}_a terimi partiküle etki edebilecek olası diğer kuvvetleri (Termoforetik kuvvet, Brownian kuvveti, Saffman' s Kaldırma Kuvveti) [10] ifade etmektedir.

Ayrıca, gevşeme zamanı (relaxation time) (F_D) açık formda şu şekilde ifade edilir:

$$F_D = \frac{18\mu C_d Re_p}{\rho_p d_p^2 24} \quad (7)$$

Burada; μ havanın moleküler viskozitesini, d_p ve Re_p partikülün çapını ve Reynolds sayısını ifade etmektedir. C_d sürükleme katsayısıdır ve ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 katsayıları ile beraber şu şekilde ifade edilmektedir [11]:

$$C_d = \frac{\xi_1}{Re} + \frac{\xi_2}{Re^2} + \xi_3 \quad (8)$$

2.4 AĞ YAPISI VE ÇÖZÜM PROSEDÜRÜ

Ağ yapısından bağımsız çözüm elde etmek amacıyla farklı ağ sıklıklarında (40x20x20, 80x40x40, 100x60x60) çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu ağ yapılarında elde edilen hız değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçların 80x40x40 ağ yapısından daha sık bir yapıda çok değişmemesinden dolayı (en fazla %5), bu ağ yapısı tercih edilmiştir.

Üfleme menfezi için "Velocity inlet" (%5 türbülans yoğunluğu), çıkış menfezi için "Pressure outlet" sınır koşulları tanımlanmıştır. Tüm duvarlar adyabatik olup kaymama sınır koşulu geçerlidir.

Basınç-hız çiftinin çözümünde SIMPLE algoritması, diferansiyel denklemlerin çözülmesinde ikinci dereceden ayrıklaştırma (second order upwind) kullanılmıştır. Hesaplamalarda, yer çekimi etkisi göz önüne alınmıştır. Yakınsama kriteri, korunum denklemleri için 10^{-6} olarak belirlenmiştir.

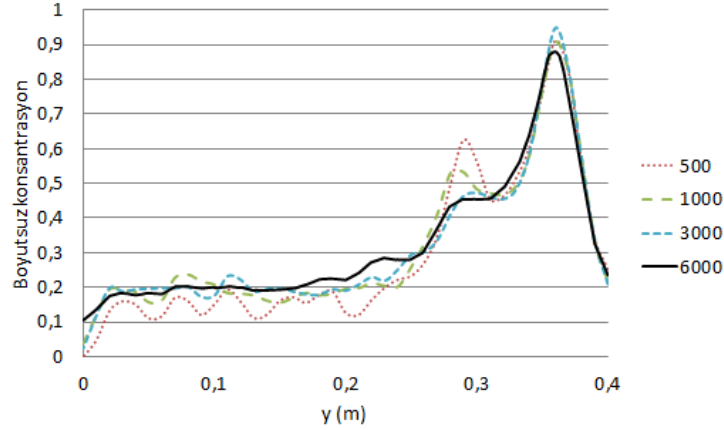
Hesaplamalarda ilk olarak sürekli rejim için oda içi hız dağılımı elde edilmiş ardından DPM (Discrete Phase Modeling) ile partikül dağılımı hesaplanmıştır. Bu adımda, ikincil faz olan partiküller için üfleme menfezi ve çıkış menfezi için "escape" sınır şartları seçilmiştir. "Escape" sınır şartında partikül hareketi sonlanır ve partikül ilgili hacmi terk etmiş olarak değerlendirilir. Partiküller bir yüzeye temas ettiklerinde ise bu yüzeye tutunabilirler veya geri dönebilirler. Mahal içi havalandırma uygulamalarında düşük hava hızları tercih edilmektedir. Bu hızlarda partiküller temas sonrası geri dönecek enerjiye sahip olmadıklarından partiküllerin temas edecekleri yüzeye tutunmaları beklenir [12]. Bu nedenle yüzeylere temas edecek partiküllerin bu yüzeylere tutunduğunu ve hareketlerinin sonlandığını ifade eden "trap" sınır şartı seçilmiştir. Daha küçük boyuttaki partiküllerin farklı hareketler sergileyebileceği ve buna bağlı olarak farklı sınır şartları seçilmesi gerekeceğine de dikkat edilmelidir.

Türbülanslı bir akış içerisinde yollanan partiküller dalgalanan ve değişen türbülanslı hız alanının etkisiyle oluşan rastgele (stokastik) yörüngeleri takip edecektir. Türbülansın bu etkileri DRW (Discrete random walk) modeli [10] kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu modelin doğru sonuçlar vermesi ve türbülans sonucu partiküllerin izleyebileceği farklı yörüngelerin değerlendirilerek ortalama bir yörüngenin hesaplanması için deneme değerinin (Number of tries) yeteri kadar yüksek belirlenmesi gerekir.

3. BULGULAR

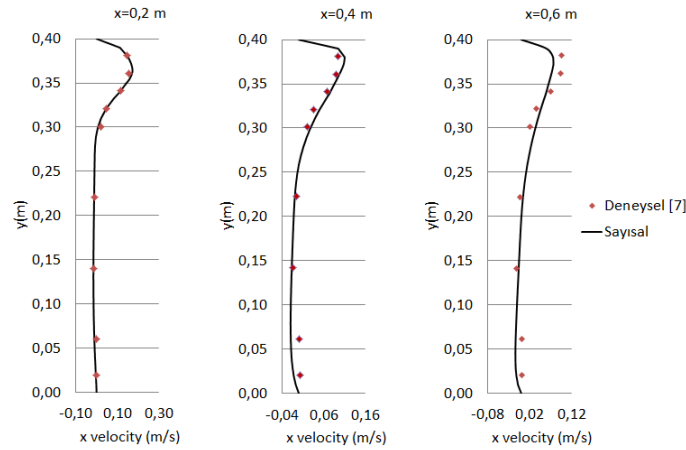
Bu bölümde hesaplanan hava hızı ve partikül konsantrasyonu değerlerinin sonuçları sunularak literatür [7] ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 2' de farklı deneme sayılarının hesaplanan konsantrasyon değerleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu durumda, türbülanslı akış için ortalama yörünge için hesaplanmasında belirli bir deneme sayısının gerektiği ifade edilebilir.



Şekil 2. Farklı deneme değerlerinin (number of tries) karşılaştırılması

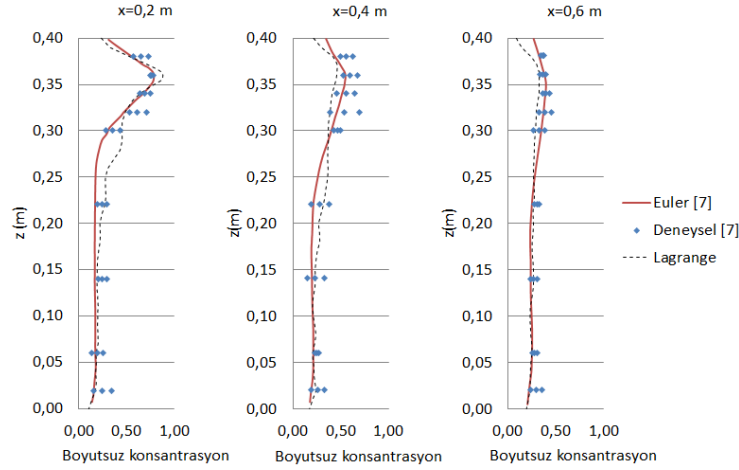
Şekil 3' de 0,225 m/s üfleme hızı için üç farklı ölçüm istasyonunda ölçülen x doğrultusundaki hız değerleri ile sayısal sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Hesaplanan hız değerlerinin deneysel çalışma ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Değerler tercih edilen sayısal yaklaşımın doğruluğunu göstermektedir.



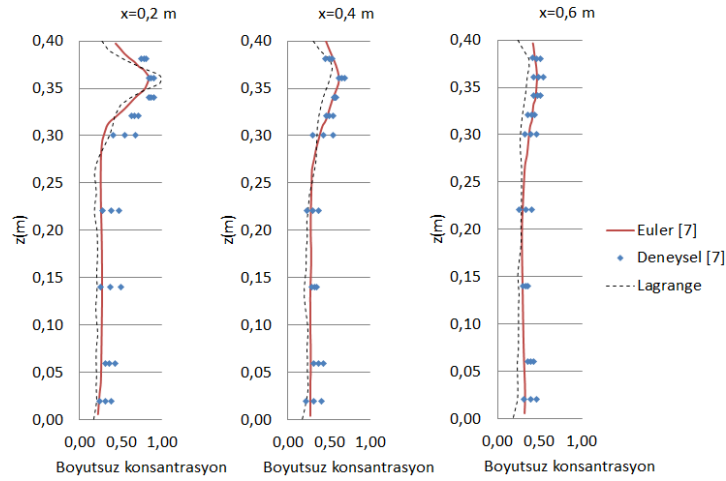
Şekil 3. 0,225 m/s giriş hızı için x doğrultusundaki hız değerlerinin karşılaştırılması

0,225 m/s ve 0,45 m/s giriş hızlarında farklı ölçüm noktaları için hesaplanan konsantrasyon değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5' te görülmektedir. Bu değerler giriş konsantrasyon değerine göre boyutsuzlaştırılarak sunulmuştur.

Şekil 4 ve Şekil 5' e bağlı olarak Lagrange yaklaşımı ile hesaplanan konsantrasyon değerlerinin Euler yaklaşımı ile benzer sonuçlar verdiği ve bu sonuçların da deneysel çalışma ile uyum içinde olduğu ifade edilebilir. Bu bağlamda duvarlar için belirlenen "trap" sınır şartının çalışılan partikül çapı da dikkate alındığında mahal içi havalandırma çalışmaları için uygun olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4. 0,225 m/s giriş hızı için konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5. 0,45 m/s giriş hızı için konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması

SONUÇLAR

Bu çalışmada Lagrange yöntemi kullanılarak literatürdeki [7] deneysel koşulları sağlayan bir sayısal model Ansys Fluent yardımıyla hazırlanarak çözülmüş, sayısal hesaplamalarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve ayırık faz modeline ait önemli noktalar belirtilmiştir.

Lagrange metodu ve kullanılan sayısal yaklaşım ile ilgili genel çıkarımlar şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Lagrange yaklaşımının kullanılacağı problemlerde dağınık fazın hacimsel fraksiyonunun %10' u geçmemesine dikkat edilmelidir.
- 2- Havalandırma çalışmaları için partikül hareketi değerlendirilirken duvarlar için "trap" sınır koşulu seçilmelidir.
- 3- Türbülanslı akışlarda türbülansın oluşturacağı etkiye dikkat edilmeli, bunun için DRW modelinin tercih edildiği durumlarda deneme sayısı yeteri kadar yüksek tutulmalıdır.
- 4- İki fazlı akışlarda problem tanımına ve sınır şartlarına dikkat edilirse Lagrange yaklaşımı da Euler yaklaşımı yerine tercih edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] RIDDLE, A., CARRUTHERS, D., SHARPE, A., MCHUGH, C., STOCKER, J., “Comparisons between FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modeling”, Atmospheric Environment, 38, 1029–1038, 2004.
- [2] ZHANG, Z., CHEN, Q., “Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms”, Atmospheric Environment, 40, 3396–3408, 2006.
- [3] LAI, A.C.K., CHEN, F.Z., “Comparison of a new Eulerian model with a modified Lagrangian approach for particle distribution and deposition indoors”, Atmospheric Environment, 41, 5249-5256, 2007.
- [4] CHANG, T.J., HU, T.S., “Transport mechanisms of airborne particulate matters in partitioned indoor environment”, Building and Environment, 43, 886-895, 2008.
- [5] ESLAMI, J., ABBASSI, A., SAIDI, M. H., BAHRAMI, M., “Effect of supply/exhaust diffuser configurations on the contaminant distribution in ultra clean environments: Eulerian and Lagrangian approaches”, Energy and Buildings, 127, 648–657, 2016.
- [6] LI, X., YIHUAN, Y., YIDAN, S., JIYUAN, TU., “An Eulerian-Eulerian Model for Particulate Matter Transport in Indoor Spaces”, Building and Environment, 86,191– 202, 2015.
- [7] CHEN, F., YU, S. C. M., LAI, A. C. K. , “Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift – flux model”, Atmospheric Environment, 40, 357–367, 2006.
- [8] YAKHOT, V., ORSZAG, S. A., THANGAM, S., GATSKI, T.B., SPEZIALE, C.G., “Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique”, Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993), 4, 1510-1520, 1992.
- [9] CHEN, Q., “Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations”, Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals, 28, 353–369, 1995.
- [10] ANSYS Fluent 15.0 User’s Guide, Ansys Inc., 2013.
- [11] MORSI, S. A., ALEXANDER, A.J., “An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, Journal of Fluid Mechanics” , 55, 193–208, 1972.
- [12] HINDS, W.C., 1982. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. Wiley, New York.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre ÇETİN

1984 Trabzon doğumludur. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden bölüm üçüncüsü olarak mezun olmuştur. Aynı yıl GEA ISISAN ’da proje mühendisi olarak göreve başlamış ve 3 yıl boyunca çeşitli projelerde görev almıştır. 2011 yılı sonundan itibaren KTÜ Arsin Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü’nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü’ nde doktora çalışmalarına devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

Orhan AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Termodinamik Anabilim Dalı öğretim üyelerinden olan Aydın, 2007 yılında profesör unvanını aldı. Mikrogeometrilere içerisinde akış ve geçişi, kaynamalı akış, elektronik sistemlerin soğutulması, ısı enerjisi depolama, kapalı ortamlarda doğal ve karma taşınım ve benzeri konularında çalışmaktadır. Yüze yakın uluslararası saygın dergide yayınlanmış makalesi, çok sayıda yurtiçi ve yurtdışı bildirisi mevcuttur.