

**T.C.**  
**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÇANAKKALE ARKEOLOJİ MÜZESİ LAHİT ODASINDAKİ**  
**PARTİKÜLLERİN DAĞILIMININ MODELLENMESİ**

**Sercan GÜLOĞLU**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Tezin Sunulduğu Tarih: 22.01.2010**

**Tez Danışmanı:**

**Yrd. Doç. Dr. Emine Dilara AYDIN**

**ÇANAKKALE**

## İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI

**Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.**

Adı Soyadı:Sercan GÜLOĞLU

## TEŞEKKÜR

Tezimin öncüsü olan değerli hocam Yard. Doç. Dr. E. Dilara Aydın'a benden bilgisini, sabrını ve desteğini esirgemediği için;

İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Murat Aydın'a her türlü sorumu büyük özveriyle yanıtladığı için;

İstanbul Teknik Üniversitesi yüksek lisans öğrencisi Barış Akay'a nümerik çözümlerdeki destek ve yardımları için;

Sevgili aileme maddi ve manevi destekleri için,

Sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürler.

Sercan GÜLOğLU

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$k$	kinetik enerji
$\varepsilon$	enerji yayılım oranı
$t$	zaman
$p$	basınç
$\rho$	yoğunluk
$T$	sıcaklık
$(u, v, w)$	hız vektörünün (x,y,z) bileşenleri
$V$	akışkanın hızı
$\mu$	dinamik (mutlak) viskozite
$\lambda$	ikinci viskozite katsayısı
$g_x, g_y, g_z$	yerçekimi kuvvetinin bileşenleri
$F$	akışkan üzerine etkiyen birim hacimdeki kuvvet
$G_k$	kayma kuvvetlerinden ötürü türbülans kinetik enerji oranı
$G_b$	kaldırma kuvvetlerinden ötürü türbülans kinetik enerji oranı
$\mu_t$	türbülans viskozitesi
$\nu$	kinematik viskozite
$S_k, S_\varepsilon$	kullanıcı tanımlı kaynak terimleri
$Y_M$	genleşme-dağılım terimi
$M_t$	Mach sayısı
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_2, C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu$	türbülans model sabitleri
$u_p$	parçacığın hızı
$\rho_p$	parçacığın yoğunluğu
$F_Z$	parçacık üzerine etkiyen tüm dış kuvvetlerin toplamı
$F_D$	sürüklenme kuvveti
$d_p$	parçacığın yarıçapı

Re	Reynolds sayısı
$C_D$	drag katsayısı
$a_1, a_2, a_3$	pürüzsüz küresel parçacıklara uygulanan sabitler
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
SEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu
RNG	renormalizasyon grubu
SE	Sonlu Elemanlar

## ÖZET

### ÇANAKKALE ARKEOLOJİ MÜZESİ LAHİT ODASINDAKİ PARTİKÜLLERİN DAĞILIMININ MODELLENMESİ

Sercan GÜLOĞLU

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Emine Dilara AYDIN

22.01.2010, 44

Bu çalışmada Çanakkale Arkeoloji Müzesi lahit odası içerisindeki hava akışı hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemleri çözen ve ticari bir yazılım olan FLUENT kodu kullanılarak modellenmiştir. Modelleme de hava içerisinde ortama salınan kirletici parçacıkların oda içerisindeki dağılımları çeşitli giriş-çıkış (pencere) durumları için incelenmiş ve bu parçacıkların lahitlere vereceği zararı minimuma indirmek için gerekli havalandırma (pencere) kombinasyonu belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Akışkanlar Mekaniği, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), parçacık transportu, doğal havalandırma, parçacık dağılımı, parçacık birikimi.

## ABSTRACT

### MODELLING OF THE DISTRIBUTION OF PARTICLES INSIDE CANAKKALE ARCHAEOLOGICAL MUSEUM SARCOPHAGUS ROOM

Sercan GULOGLU

Canakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Science and Engineering

Chair for Physics Thesis of Master of Science

Advisor: Asis. Prof. Emine Dilara AYDIN

22.01.2010, 44

In this work, the air flow inside Canakkale Archaeological Museum sarcophagus room is modelled with FLUENT which is a commercial software providing solutions to Computational Fluids Dynamics problems. In the model, the distribution of the pollutant particles in the air released into the room is investigated for several inlet-outlet (window) combinations and the best ventilation condition to minimize the damage of the pollutants to the sarcophagus is determined.

**Keywords:** Fluid Mechanics, Computational Fluid Dynamics (CFD), particle transport, natural ventilation, particle distribution, particle deposition.

# İÇERİK

## Sayfa

TEZ SINAV SONUÇ BELGESİ .....	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI .....	iii
TEŞEKKÜR .....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	v
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	viii
<b>BÖLÜM 1 – GİRİŞ .....</b>	<b>2</b>
<b>BÖLÜM 2 – ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>4</b>
<b>BÖLÜM 3 – AKIŞKANLAR MEKANİĞİNİN TEMEL DENKLEMİ .....</b>	<b>9</b>
<b>BÖLÜM 4 – ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE SONUÇLAR .....</b>	<b>15</b>
4.1. Çözüm yöntemi .....	15
4.2. Test problemi .....	17
4.3. Müze problemi .....	23
4.3.1. Geometri .....	25
4.3.2. Sınır koşulları .....	27
4.4. Sonuçlar .....	28
<b>BÖLÜM 5 – TARTIŞMA VE ÖNERİLER .....</b>	<b>39</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>41</b>
<b>Ekler .....</b>	<b>I</b>
<b>Çizelgeler .....</b>	<b>XI</b>
<b>Şekiller .....</b>	<b>XII</b>
<b>Özgeçmiş .....</b>	<b>XV</b>



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Hava kirliliği çağımızın üzerinde önemle durulması gereken en büyük sorunlarından biridir. Hava kirliliğinin olumsuz etkileri sadece insan sağlığı, bitkiler, hayvan sağlığı ve materyaller üzerinde değildir. Sanatsal ve mimari yapılar da hava kirliliğinin bozucu ve tahrip edici etkisinden nasibini almaktadırlar (Belli, 2009). Hava ortamındaki temel kirleticiler genellikle kükürt dioksit, ozon ve azot oksitlerden meydana gelmektedir. Bunlar ısınma, motorlu taşıtlar ve sanayi gibi kaynaklardan oluşarak atmosfere yayılmakta ve oradan da iç ortamlara taşınmaktadır. Bu kirleticiler kapalı ortamlarda yapışıkları malzemelerde, malzemenin cinsine bağlı olarak zamanla renksizleşme, kirlenme, kararma ve korozyon, tozlaşma ve çatlak oluşumu gibi zararlı etkiler meydana getirirler (Karaca ve ark., 2009).

Böyle kirlilik ve kimyasal değişimin önlenmesinde akla gelen ilk adım ortamın uygun bir şekilde havalandırılmasıdır. Eğer kapalı ortam doğal havalandırma için uygunsa, iyi bir hava kalitesi ve temiz hava sağlanabilir. En yaygın olarak kullanılan doğal havalandırma tekniği pencerelerdir ve bu şekilde havalandırma okul, laboratuvar ve ofis gibi binalarda kullanılmaktadır. Doğal havalandırma tekniğinin uygun olmadığı müze, kütüphane, galeri v.b. gibi kapalı alanlarda bina ve şartlara uygun havalandırma tekniklerinin kullanımı bir gerekliliktir. Bu tekniklerden bir tanesi ve en çok kullanılanı klima gibi mekanik havalandırma sistemidir. Eğer bu sistem iç ortam kirlilik kontrolü için seçilirse, sistemin müze ve kütüphane gibi ortamların ruhuyla uyumsuz, gürültülü, kesintisiz enerji, bakım, izleme ve kontrol gerektiren bir sistem olduğu unutulmamalıdır.

Ülkemizde genellikle eski ve tarihi binalar müze olarak kullanılmaktadır. Bu binaların kendilerinin de tarihi ve kültürel bir eser olması dolayısıyla havalandırma uygulamalarında çeşitli yapısal ve mekanik problemlerle karşılaşmaktadır. Mekanik havalandırma sistemleri gibi modern sistemlerin bu tip binalarda kurulması ve uygulanması genellikle mümkün olamamaktadır. Mesela, Topkapı ve Dolmabahçe Sarayı gibi tarihi ve önemli binalarda yasal, teknik ve estetik nedenlerle sistemin uygulanması mümkün değildir. Bu sistemler modern müzeler için kirlilik kontrolü ve iklimlendirme de kullanılabilecek en uygun alternatiftir.

Ülkemizde müzelerle ilgili bir başka önemli problem de önerilen veya uygulanmakta olan bir Risk Durum İndeksi'nin bulunmamasıdır. Bu indeks, iç ortam şartları ve kirletici parametrelerini bir arada ele alarak değerlendirir ve her bir bina için ayrı ayrı planlanarak uygulamaya konulur. Gelişmiş ve Avrupa Birliği üyesi ülkelerde müze ve tarihi mekânlar da sergilenen ve saklanan eserlere hava kirleticilerin etkisi hakkında çalışmalar yapılarak yönergelerle yaptırım uygulanmaktadır (Larsen, 1996). Maalesef ki ülkemizde henüz böyle bir çalışmaya başlanmamış ve konuyla ilgili bir yönerge veya uygulama da bulunmamaktadır.

Bu çalışmada Çanakkale il merkezinde bulunan Çanakkale Arkeoloji Müzesi lahit odası araştırma alanı olarak alınmıştır. Bu oda içerisindeki hava akışı FLUENT kodu kullanılarak modellenmiştir. FLUENT, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) problemlerine çözüm sağlayan ticari bir yazılımdır. Modelleme de odada ki farklı havalandırma (pencere) durumları için hava akışı ile birlikte ortama farklı büyüklüklerde kirletici parçacıklar gönderilmiştir. Parçacıkların oda içerisindeki dağılımları bu durumlar için incelenmiştir. Ayrıca parçacıkların lahitler üzerindeki olumsuz etkilerini minimuma indirmek için en uygun giriş-çıkış durumu da tartışılmıştır.

## BÖLÜM 2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Hava kirliliğinin tarihi ve kültürel yapılara ve malzemelere zarar verdiği yapılan çalışmalarla ortaya konulmuş bir gerçektir. Özellikle tarihi ve kültürel mirasın depolandığı ve sunulduğu müzeler ve müzelerle birlikte arşiv ve kütüphaneler de hava kalitesi faktörü gözönüne alındığında büyük bir risk altındadır. Bu konu son yıllarda büyük bir güncellik kazanmış ve müze gibi kapalı ortamların iç ortam kalitesi hakkında bir çok bilimsel makale yayınlanmıştır (Camuffo ve ark., 2001, Kontozova-Deutsch ve ark. 2008, Worobiec ve ark., 2008, Schieweck ve ark., 2005, 2007, La Gennusa ve ark., 2005). Kirleticilerin ve iç ortam hava kalite parametrelerinin müze ve tarihi mekanlar da bulunan eserler ve malzemeler üzerindeki etkileri iki derleme makale de detaylı bir biçimde incelenmiş ve tartışılmıştır (Baer ve Banks, 1985, Brimblecombe, 1990).

Kapalı ortamlarda bulunan insanların sağlığı açısından ortamdaki havanın kalitesi ve havalandırma sisteminin tasarımı çok büyük önem taşımaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalardan birinde, farklı şekilde havalandırılmış displacement (giriş ve çıkış farklı yüzeyde) ve mixing (giriş ve çıkış aynı yüzeyde) ventilation aynı büyüklükte iki oda göz önüne alınmıştır (Zhao ve ark., 2004). Bu odaların duvar ve zeminindeki parçacık birikimi, farklı parçacık büyüklüğü için drift-flux modeli kullanılarak hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Her iki havalandırma durumu için parçacık büyüklüğü arttıkça bununla orantılı olarak zeminde biriken parçacık sayısının duvarda birikenden fazla olduğu bulunmuştur. Ayrıca ortalama birikme hızı ve oranının her iki havalandırma durumunda da hemen hemen aynı olduğu ve bunların sadece parçacığın özelliklerine bağlı olduğu görülmüştür.

Yine Zhao ve arkadaşlarının (2004) yaptığı bir başka çalışmada farklı şekilde havalandırılan odalar için parçacık yoğunluğu ve birikimi Euler metoduyla hesaplanmıştır. Parçacıkların yolunu izlemek için ayrık yörünge modeli (discrete trajectory model) Euler metodu ile birleştirilmiştir. Sonuç olarak havalandırılan alandaki parçacıkların hareketinin, hava akış modelinden önemli oranda etkilendiği ve parçacıkların büyüklüğü arttıkça daha az parçacığın ortamdan kaçtığı ve daha fazla parçacığın odada biriktiği görülmüştür. Aynı zamanda odalar içerisine verilen hava miktarları ve parçacık özellikleri değişmediği halde,

parçacık yoğunluğu ve birikme oranının odalarda büyük farklılıklar gösterdiği gözlenmiştir.

Kapalı ortamlarda konfor kadar minimum enerji kullanımı da çok önemlidir. Minimum enerjiyi sağlamanın bir yolu, taze veya temiz havanın iyi bir tasarım ile ortama verilmesi ve dağıtılmasıyla mümkündür. Kuas ve Başkaya (2002) içerisinde nesnelere ve bir kişinin bulunduğu ofis odasını HAD yardımı ile modellemişlerdir. Üç boyutlu sıkıştırılamaz akış için süreklilik, hareket ve enerji denklemleri çözülmüştür. Displacement havalandırma yöntemi kullanılarak konfor için en uygun giriş-çıkış durumu saptanmıştır. Hız değerleri de konfor şartları açısından önemli olduğundan insan etrafındaki hız değerlerine bakılmış, odanın değişik bölümlerindeki hız vektörleri ile sıcaklık dağılımları da incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar ile sonuçlar karşılaştırıldığında oda hacminin boş veya dolu olmasının konfor açısından çok önemli olduğu bulunmuştur. Minimum enerji kullanımı için en uygun giriş-çıkış yeri de çalışmada belirlenmiştir. Fakat daha kesin çözümler elde edebilmek için daha fazla parametrik çalışma yapılmasının gerekli olduğu görülmüş ve vurgulanmıştır.

HAD ile çözülen diğer bir kapalı ortam probleminde, büyük ofis odalarında sıklıkla kullanılan iç ara bölmenin, hava kalitesi ve havalandırma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir (Lee ve Awbi, 2004). Kirletici kaynaklı küçük bir oda modeli alınarak bölmenin yeri, kalınlığı ve zeminden yüksekliği gibi parametreler için deneysel ve nümerik çözümler yapılmıştır. Nümerik çözümlerde zamandan bağımsız sıkıştırılamaz akış için k-e türbülans modeli kullanılmıştır. Bölme, oda uzunluğunun % 40 dan (havanın tavandan giriş bölümü) odanın ortasına hareket ettirildiğinde, hava kalitesinin çok küçük oranda düzeldiği, odanın % 40 dan % 60 na (havanın tavandan çıkış bölümü ve kirletici kaynağın olduğu bölüm) alındığında ise havalandırma etkisinin çok daha fazla arttığı gözlenmiştir. Altında boşluk olmadan bölmenin yüksekliği arttırıldığında oda hava kalitesi ve havalandırma performansı çok az değişmiştir. Fakat kirletici kaynak çıkış bölgesine yerleştirildiğinde havalandırma etkisinin bölme yüksekliğindeki artışla azaldığı görülmüştür. Alttaki boşluğun % 10 arttırılmasıyla hava değişim veriminde genel anlamda gelişme olmuştur. Kaynak giriş bölümündeyken havalandırma verimi, boşluğun arttırılmasıyla artmakta fakat boşluk yüksekliğinin % 5 i oranındaki maksimum artış kaynak çıkış bölümüne alındığında gözlenmektedir.

İsveç’ de bulunan Falun Hastanesi’n de yapılan diğer bir tez projesinde hastalara ve aynı zamanda çalışan ve ziyaretçilere sağlıklı ve temiz bir atmosfer sağlamak için en uygun HAD çözüm modelinin bulunması amaçlanmıştır (Ferri ve Marin, 2008). Farklı oda ve koridorlarındaki hava akış hareketi ile bu akışın sıcaklık dağılımına etkisi FLUENT k-e modeli kullanılarak incelenmiş ve çözümler için yeterliliği tartışılmıştır. Modelin uygulanmasının pratik olduğu fakat hava giriş-çıkış yerlerindeki farklılıklar için daha iyi bir çalışmaya ihtiyaç duyulduğu, ayrıca modelin doğrulanması için bütün koridorlarda tabandan tavana sıcaklık gradyentinin ve farklı yüksekliklerdeki hava hızları gibi birçok ölçümün gerekli olduğu bulunmuştur. Çalışmadaki en önemli problem, bu çok büyük modelin simülasyonu için gerekli olan datanın çok karışık ve fazla olmasıdır. Ve bu data bilgisi olmadan çözümlerin ve modelin doğruluğunun bilinmesi imkansızdır.

Kapalı ortamlarda biriken parçacıklar zamanla buralarda kirlilik ve kimyasal değişim ve buna bağlı olarak zarara neden olabilirler. Bu yüzden özellikle müze atmosferlerindeki parçacıklar sanat eserleri için büyük bir tehlike oluştururlar. Eserlerin uzun süreli korunumu ve gezen insanların konforu açısından havalandırma müzelerde çok büyük önem taşımaktadır. Bu konuda yapılan nadir çalışmalardan birinde sanat eserlerini havada biriken parçacıklardan koruma amaçlı bir proje başlatılmıştır. Proje kapsamında kapalı alandaki parçacıkların dinamiğinin simülasyonu için bir matematiksel model geliştirilmiş ve bu modelde yüzeylerdeki parçacık birikim hızı araştırılmıştır (Nazaroff ve Cass 1989a, 1989b). Model, müzelerde zamana bağlı parçacık büyüklük dağılımlarını ve kimyasal oluşumları doğru olarak hesaplayabilmekte ve bina havalandırma sisteminde ve dışarıdaki aerosol yoğunluğu ve oluşumuna bağlı karakteristikleri de verebilmektedir (Nazaroff ve ark., 1990). Bu modelle üç alanda yapılan hesaplamalar genellikle müzelere giren küçük parçacıkların (yarıçap 0.05-2  $\mu\text{m}$ ) % 1 inden az miktarının duvarlarda biriktiğini göstermiştir. Müzeye giren parçacıkların çok küçük bir kısmı duvarlarda birikiyor olsa da, ilk buldukları orijinal durumlarında mümkün olduğunca uzun süre korunmak istenen sanat eserleri için bu birikim zamanla çok büyük tehlike oluşturmaktadır.

Bu modelle elde edilen parçacık birikim hızlarını doğrulamak için yapılan iki ayrı fakat birbirini tamamlayan çalışmada, model ile direkt ölçümler karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Güney Kaliforniya’da bulunan beş farklı müze alınmış, her bir müze de tek bir

duvar parçacıklarının birikim ölçümü için seçilmiş ve duvarın çeşitli yerlerine birçok toplayıcı levha yerleştirilmiştir. Analiz için uygun parçacıkların toplanması ve aynı zamanda uzun vadeli tehlikeler olan kirlilik ve korozyon gözlemi için toplama işlemi üç ayrı dönem de ve yaklaşık 10 ar hafta süre ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan parçacıkların çapları özellikle 0.05-1 µm arasında alınmıştır çünkü atmosferde kirliliğe sebep olan karbon elementi gibi parçacıklar bu büyüklüktedir (Cass ve ark., 1984) ve böyle parçacıklar çok önemli kirlilik riski oluştururlar (Quimette, 1981). İlk çalışmada parçacık birikme hızı ve ortalama yoğunluk ölçümleri otomatik parçacık sayma tekniği ile yapılmıştır (Ligocki ve ark., 1990a). Bu teknikte enerji ayırıcı X ışını detektörü ile donanmış bilgisayar kontrollü bir tarayıcı elektron mikroskobu (SEM-scanning electron microscope) ve geleneksel kimyasal analiz metodu birleştirilerek kullanılmıştır. Böylece havada asılı duran ve biriken parçacıklar beş müze alanı için tanımlanarak bu bilgiden, yatay ve dikey yüzeylerde birikme hızları parçacık büyüklüğünün fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Tüm çalışma alanlarında dikey yüzeylerde parçacık birikme hızları  $10^{-6}$  ile  $10^{-5}$  m/s aralığında bulunmuştur. Birikme hızları aynı zamanda sülfat, nitrat, amonyum ve klor iyonları için iyon kromatografisi kullanılarak da ölçülmüş ve her bir müze için bunların birikme oranları verilmiştir.

Yukarıdaki çalışmada iki bağımsız metot kullanılarak beş farklı müzenin yatay ve düşey iç yüzeyleri için ölçülen parçacık birikme hızları büyük bir veri sağlamış ve bu veri teoriye dayalı modeli test etmede kullanılmıştır (Nazaroff ve ark., 1990b). Ölçümler ile model sonuçlarının birleşimine dayanılarak her bir çalışma alanındaki duvar için en iyi birikme hızı elde edilmiştir. Bu hızlar 0.05-µm çaplı parçacıklar için  $(1.3-20) \times 10^{-6}$  m/s ve 1-µm çaplı parçacıklar için de  $(0.1-3.3) \times 10^{-6}$  m/s arasında bulunmuştur. Verilen bir parçacık büyüklüğü için hesaplanan birikme hızları yüzey yakınındaki hava akışına bağlı olarak bir birimden daha büyük miktarlarda değişim göstermektedir. Bu yüzden ilave çalışmalarla binalarda duvar yakınındaki hava akış doğasının bakılması teorik olarak parçacık birikim hesaplamalarını geliştirmek için şiddetle önerilmiştir.

Müzelerle ilgili diğer bir çalışmada ise Dunhuang müzesi için doğal bir havalandırma sistemi dizayn edilmiştir (Zhang ve Guan, 2006). Doğal havalandırma ekolojik odaklı mimaride geniş olarak kullanılan tekniklerden biridir. Dinamik termal

(thermal dynamic simulation) ve HAD simülasyonları kullanılarak müzedeki büyük sergi salonu için en uygun doğal havalandırma şekli bulunmuştur.

### BÖLÜM 3

#### AKIŞKANLAR MEKANİĞİNİN TEMEL DENKLEMLERİ

Akışkanlar mekaniğinin temel denklemleri sıvılar ve gazlar gibi akışkanların hareketini tanımlamaya yarayan ve ismini Fransız mühendis C.L. Navier ve İngiliz matematikçi Sir G. G. Stokes dan alan Navier-Stokes denklemleridir (Anderson, 1995, Çengel, 2008). Navier-Stokes denklemleri oldukça kompleks ve analitik olarak çözümleri çok zor olan ikinci dereceden lineer olmayan bir dizi kısmi diferansiyel denklemi içerir ve bu denklemler momentum, kütle ve enerji korunumunun temel prensiplerinden elde edilir. Geçmişte mühendisler bu denklem dizisine ilave yaklaşım ve basitleştirmeler yaparak çözülebilir bir denklem grubu elde etmiş olsalar da günümüzde yüksek hızlı bilgisayarların gelişimi ve kullanılmasıyla denklemler nümerik olarak çözülebilir hale gelmiştir. Kullanılan nümerik çözüm teknikleri arasında sonlu farklar, sonlu hacim, sonlu element ve spektral metotlar v.b. yer almaktadır ve bu çalışma alanı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics - CFD) olarak adlandırılmaktadır (Glenn Research Center, 2008).

Denklemler akademik konularda birçok şeyin fiziğini açıkladıkları için çok kullanışlıdır. Mesela hava ve okyanus akıntılarını, bir borudaki su akışını, bir kanat etrafındaki hava akımını ve galaksideki yıldız hareketlerini modellemek için kullanılabilirler. Genel ve basitleştirilmiş Navier-Stokes denklemleri, uçak, araba ve güç istasyonlarının tasarımlarında, damarlardaki kan akışı çalışmalarında, kirlilik analizinde ve daha bunlar gibi birçok diğer çalışma konularında çözüm için yardımcıdır. Maxwell denklemleriyle birleştirildiklerinde ise magnetohidrodinamik konularında modelleme ve çalışma yapmak için kullanılabilirler. (Wikipedia, 2003).

Bu denklemler kullanılırken akışkanlar hakkında iki tane kabulün yapılması gerekir. Bunlardan birincisi, akışkanın tamamının aynı özellikte olduğu, içerisinde farklı biçim ve formlar bulunmadığı (sürekli olduğu), ikincisi ise denklemin kullanıldığı konu ile ilgili hız, yoğunluk, basınç, sıcaklık gibi tüm alanların diferansiyel (faz değişimleri yok) olduğudur.

Navier-Stokes denklemleri kütle korunumu kanundan gelen zamana bağlı bir süreklilik denklemi, üç tane yine zamana bağlı momentum korunum denklemleri ve bir



tane de enerji korunum kanunundan gelen enerji denklemi olmak üzere 5 denklemden oluşur. Denklemler,  $(x, y, z)$  koordinatları ve  $t$  zaman olmak üzere dört tane bağımsız değişken ile basınç  $p$ , yoğunluk  $\rho$ , sıcaklık  $T$  (enerji denkleminde), hız vektörünün  $(x, y, z)$  yönündeki üç bileşeni  $(u, v, w)$  olmak üzere 6 tane de bağılı değişken içerir. Tüm bağılı değişkenler dört bağımsız değişkenin fonksiyonudurlar ve bu yüzden denklemler kısmi diferansiyel denklemlerdir.

Çalışmada ortamdaki yerel sıcaklık değişimlerinin olmadığı veya çok küçük olduğu varsayılarak akışın izotermal olduğunu kabul edilmiş, bu yüzden enerji denklemi çözümlere dahil edilmemiştir. Aynı zamanda akış sıkıştırılamaz türbülans akış olarak alınmış ve modelde sıkıştırılamaz akış için geçerli olan Navier-Stokes denklemleri çözülmüştür.

Kütle korunumundan gelen diferansiyel denklem

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3.1)$$

şeklinde dir. Burada  $\rho$  kütle yoğunluğu (birim hacim başına kütle) ve  $\mathbf{V}$  ise akışkanın hızıdır (Anderson, 1995). Sıkıştırılamaz bir akış için  $\rho$  akış boyunca değişmez, yani

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \cong 0 \quad (3.2)$$

ve  $\rho$ , operatörün dışına alınarak denklem (3.1) şu halde yazılabilir:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3.3)$$

(3.3) denklemi sıkıştırılamaz akış için süreklilik denklemidir. Denklem,  $\mathbf{V}$  hızının  $(u, v, w)$  bileşenleri için,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir (Çengel, 2008).

Newton'un ikinci yasasından yola çıkarak elde edilen momentum denkleminin (Navier-Stokes denkleminin) kartezyen koordinatlardaki her bir bileşen için en genel halde aşağıdaki gibidir (Anderson, 1995):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho g_x \end{aligned} \quad (3.5a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho g_y \end{aligned} \quad (3.5b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (3.5c)$$

Burada  $p$  basınç,  $\mu$  akışkanın viskozite katsayısı veya dinamik (mutlak) viskozite,  $\lambda$  ikinci viskozite katsayısı ( $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ ) ve  $(g_x, g_y, g_z)$  de  $g$  yerçekimi kuvvetinin bileşenleridir. Bu denklemler (3.3) denklemleri ile birleştirilirse,

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.6a)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.6b)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.6c)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler sıkıştırılamaz akış için momentum ya da Navier-Stokes denklemleridir ve kapalı (vektörel) formda şu şekilde yazılabilir:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F} \quad (3.7)$$

Burada  $\mathbf{F}$ , yerçekimi veya merkezkaç kuvvet gibi akışkan üzerine etkiyen birim hacimdeki kuvvettir. (3.6) denklemlerinden de görüleceği gibi hesaplamalarda akışkana etkiyen kuvvet olarak ( $\mathbf{F} = \rho \mathbf{g}$ ) yerçekimi kuvveti alınmıştır.

Çalışmada müze içerisindeki havanın modellenmesi k- $\varepsilon$  türbülans modeli ile yapılmıştır. k- $\varepsilon$  model, en çok kullanılan türbülans modellerden biridir. İki denklemlidir yani akışın türbülans özelliklerini tanımlamak için fazladan iki transport denklemi içerir. İlk taşınan türbülans değişkeni kinetik enerji k ve diğeri de  $\varepsilon$  enerji yayılımı (harcanım) oranıdır. k türbülanstaki enerjii belirleyen,  $\varepsilon$  da türbülansı derecelendiren ya da ölçeklendiren değişkendir. Üç tane k- $\varepsilon$  modeli vardır: Standart k- $\varepsilon$ , gerçekleştirilebilir (relizable) k- $\varepsilon$  model ve RNG k- $\varepsilon$  model. Bu modeller hakkında ayrıntılı bilgi bir çok referans da bulunabilir (CFD-Online, 2006; FLUENT 6.3 User's Guide, 2006). Bu çalışmada gerçekleştirilebilir (relizable) k- $\varepsilon$  model kullanılmıştır.

Relizable k- $\varepsilon$  model için transport ya da momentum denklemleri aşağıdaki şekilde verilir: (FLUENT 6.3 User's Guide, 2006):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + Y_M + S_k \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (3.9)$$

Burada,

$$C_1 = \max \left[ 0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

dir. Denklemlerdeki  $G_k$  ve  $G_b$  sırasıyla kayma ve kaldırma kuvvetlerinden ötürü türbülans kinetik enerjisi üretim oranlarıdır ve değerleri

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho_i}{\partial x_i} \quad (3.10)$$

formülleri yardımıyla hesaplanır. Burada,  $\mu_t$  türbülans viskozitesi,  $\nu$  kinematik viskozite,  $S_k$  ve  $S_\epsilon$  kullanıcı tanımlı kaynak terimleri ve  $Y_M$  genişleme-dağılım terimidir (dilatation dissipation term).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad Y_M = 2 \rho \epsilon M_t^2 \quad (3.11)$$

Burada  $M_t$  Mach sayısı ve  $C_\mu$  türbülans model sabitidir. Bunların ve ayrıca denklemlerdeki  $\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_2, C_{1\epsilon}, C_{3\epsilon}$  gibi diğer türbülans model sabitlerinin değerleri şu şekilde verilmiştir:

$$\begin{array}{lll} C_\mu = 0,09 & \sigma_k = 1,0 & \sigma_\epsilon = 1,2 \\ C_{1\epsilon} = 1,44 & C_2 = 1,9 & C_{3\epsilon} = 1,0 \end{array}$$

Odaya verilen kirletici ya da toz parçacıkların ( ki bunlar kalsiyum karbonat -  $\text{CaCO}_3$  ve kükürt - S olarak alınmıştır) hava içerisindeki hareketi FLUENT'in discrete phase modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Parçacıkların izledikleri yol, parçacık üzerine etkiyen denge kuvvetlerinin integrali ile hesaplanmıştır. Lagrange formülasyonu ile parçacık hızını, kartezyen koordinat sisteminde z yönü için veren denklem (Yılmaz ve ark., 2008)

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u - u_p) + \frac{g_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_Z \quad (3.12)$$

şeklindedir. Burada  $u_p$  ve  $u$  sırasıyla parçacığın ve havanın hızı  $\rho_p$  ve  $\rho$  da yine sırasıyla parçacığın ve havanın yoğunluğudur. Denklemden  $F_Z$ , havadaki parçacıkların üzerine etkiyen tüm dış kuvvetlerin toplamını verir. Burada Brownian hareketi ve

Saffman'ın kaldırma kuvveti düşünülmüştür. Brownian hareketi ve Saffman'ın kaldırma kuvveti için detaylar Li ve Ahmadi (1992) tarafından yapılan çalışmada bulunabilir. Denklem (3.12) deki  $F_D$  ise sürüklenme (drag) kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (3.13)$$

Bu eşitlikte,  $\mu$  havanın viskozitesi,  $d_p$  parçacığın yarıçapı, Re de Reynolds sayısıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3.14)$$

Drag katsayısı olan  $C_D$  ise

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (3.15)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanır. Burada  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$ , çeşitli Reynolds sayıları üzerinden pürüzsüz küresel parçacıklara uygulanan sabitlerdir (Morsi ve Alexander, 1992).

## BÖLÜM 4

### ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE SONUÇLAR

#### 4.1 ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Birçok mühendislik alanında karşılaşılan üç boyutlu, zamana bağlı olarak değişen, karmaşık geometrilere sahip ve türbülanslı akış içeren problemlerin çözümünde HAD simülasyonları günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle paralel bilgisayar öbeklerinin yardımı ile böyle üç boyutlu, karmaşık akış problemlerinin yüksek başarılı hesaplamalar ile çözümleri mümkün hale gelmiştir. Yüksek başarılı hesaplama çözülmesi zor ve hız, hafıza ve saklama alanı açısından yüksek bilgisayar gücü isteyen problemlerin süper bilgisayarlarda paralel hesaplama ile çözülmesidir. Bizim problemimizde de geçerli olan türbülanslı akışlar üç boyutlu, düzensiz ve zamana bağlı akışlardır. Bu akışlarda zaman ve uzayda uzunluk ölçekleri geniş bir dağılıma sahiptir ve Reynolds sayısı ile değişmektedir. Türbülanslı akışların simülasyonları için büyük eddi simülasyonları (Large Eddy Simulations), direkt sayısal simülasyonlar (Direct Numerical Simulations) ve Reynolds ortalama Navier Stokes çözümleri (Reynolds Averaged Navier-Stokes) gibi çeşitli modelleme ve simülasyon methodları vardır. Her bir metodun kullanılabilirliği çözülen problemin yapısına ve cinsine bağlıdır. Ayrıca hesaplama maliyeti de (çözüm için gereken çözüm ağı nokta sayısı) kullanılan simülasyon methoduna göre değişim göstermektedir.

HAD simülasyon adımları ön-işleme (preprocessing), hesaplama ve ard-işleme (postprocessing) olarak üç kısma ayrılır. İlk adım olan ön-işleme adımında geometrinin tanımlanarak katı modelleme yazılımları ile oluşturulması, geometrideki hesaplama alanının belirlenmesi, mesh ya da grid dediğimiz çözüm ağının oluşturulması ve oluşturulan bu çözüm ağının akış çözücü için uygun formatta hazırlanması yer alır. Hesaplama bölümünde probleme uygun sayısal yöntem ve algoritmalar ile sınır koşulları seçilerek hesaplama alanı ve çözüm ağı üzerinde akış çözücüler yardımıyla hesaplamalar yapılır. Son kısım olan ard-işleme de ise elde edilen çözüm ya da veriler analiz edilerek bunlar grafikler, eş değer eğriler, üç boyutlu görüntü ya da animasyonlar ile görüntülenir ve yorumlanır.

Paralel hesaplama, göz önüne alınan problemin parçalara ayrılarak paralel bilgisayar öbeklerinde birden fazla işlemciye dağıtılmasıdır. İşlemciler arası gerekli haberleşme, paralel hesaplama dilleri yardımıyla yapılır ve uygun paralel programlama algoritmaları kullanılarak problemin çözümü sağlanır. Paralel hesaplama ile çözüm, programa müdahale edebilme, değişken veya yöntem değiştirebilme, gerçek zamanlı çözümü görüntüleyebilme gibi olanaklarla kullanıcılara kolay analiz imkânı vermekte ve bu yüzden paralel hesaplama önemli hale gelmektedir.

Bu çalışmada Çanakkale Arkeoloji Müzesi Lahit Odası içerisindeki hava akışının simülasyonunda üç boyutlu, paralel ve sonlu hacim yaklaşımı kullanan FLUENT yazılım paketi kullanılmıştır. Genel amaçlı bir yazılım olan FLUENT' in havacılık, otomotiv, beyaz eşya, turbo makine endüstrileri ve yine kimya, yiyecek endüstrisi gibi farklı endüstrilere ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümlerinde kullanılabilir olması popülaritesini arttırmıştır. FLUENT' in uygulama alanları olarak kısaca uçak kanadı etrafındaki akış, yanma, biyolojik akış, yarıiletken üretimi, temiz oda tasarımı, atık su işleme, motor tasarımı ve çok fazlı akışlar sayılabilir. Kolay kullanımı, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve içerdiği değişik fiziksel modeller sayesinde kullanıcıların en zor ve karmaşık problemlerine hızlı ve güvenilir çözümler üretebilen FLUENT, bu özelliklerinde dolayı AR-GE bölümlerinin tasarım aşamasındaki en güvenilir aracı olmaya adaydır. FLUENT'in genel özellikleri Ek 1 de verilmiştir.

Odanın geometri ve çözüm için gereken ağ yapısı (mesh) FLUENT ile birlikte kombine çalışan GAMBIT ile oluşturulmuştur. HAD ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön-işlemci olan GAMBIT, model hazırlama ve ağ oluşturma işlemlerini kolaylaştıran ve hızlandıran bir yazılımdır. GAMBIT, sahip olduğu katı modelleme araçları ile orta derecede karmaşık geometrilerin oluşturulmasına imkân verir. Aynı zamanda gelişmiş geometri alım kapasitesi ile diğer profesyonel katı modelleme programlarından model alımına olanak tanıyarak kullanıcıya büyük bir esneklik ve kolaylık sağlayan bir yazılımdır. Kullanımı kolay olan GAMBIT ile iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise dört yüzlü, altı yüzlü ve geçiş elemanları olarak kama ve piramit tipi elemanlar kullanılabilir ve böylece istenilen tipteki çözüm ağı basit ve hızlı bir şekilde oluşturulabilir.

Sonlu hacim metodu, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen problemlerin nümerik çözümlerini veren ve HAD de çok kullanılan ayrıklaştırma tekniklerinden biridir. Sonlu hacim metodunda çözüm alanı, hücre ya da element dediğimiz belirli kontrol hacimlerine bölünür ve her sonlu hacim parçasına korunum denklemleri uygulanır. Hesaplanacak bağımlı değişken hacmin merkezindeki kontrol noktasındaki değer ile ifade edilir. Bu hacimler, akışkanın bir bölümü olarak veya akışkanla hareket eden ayrı bir hacim olarak alınır.

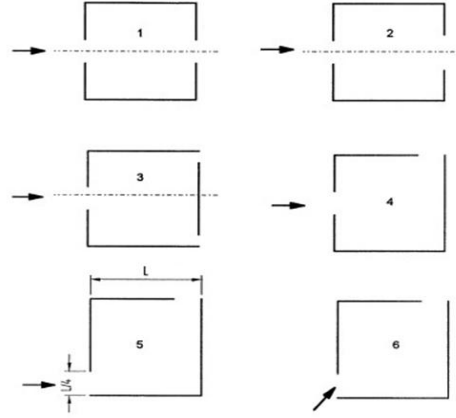
Problemi ifade eden ana denklemlerin diferansiyel formunun her bir kontrol hacmi üzerinden integrali alınır ve böylece sonlu hacim yöntemi ile her bir hacim için ayrıklaştırılmış cebirsel denklemler elde edilir. Bu denklemlerde uygun metotlar ile çözülür.

#### **4.2. Test problem**

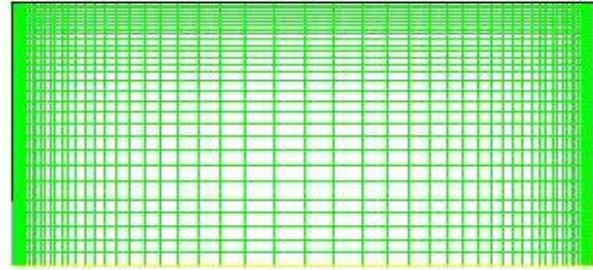
Bu bölümde FLUENT kodunu test etmek amacıyla literatürden bir çalışma ele alınıp çözümler karşılaştırılmıştır (Ayad, 1999). Çalışmada 1x1 lik bir oda içerisindeki hava akışı 6 farklı giriş-çıkış durumları için modellenmiştir. Odanın havalandırma şartları (giriş-çıkış) Şekil 4.1 de verilmiştir. Hesaplamalarda iki-denklemlilikli türbülans model kullanılmıştır. Ayrıca oda içerisindeki hava hareketleri doğal soğutma kaynakları olarak ele alındığından hesaplamalar da izotermal koşullar uygulanmıştır. İlk üç durumda çapraz (giriş ve çıkış karşılıklı) havalandırma seçilmiştir. Bu üç durum için odanın ortasındanyukarı ve aşağı kısımlarda simetrik akışlar elde edildiğinden sonuçlarda sadece odanın üst kısmına yer verilmiştir. Diğer üç havalandırma da giriş ve çıkışlar komşu yüzeylerde alınarak problem çözülmüştür.

Çözümde kartezyen dikdörtgen kontrol hacimleri (gridler) kullanılmıştır. Problemin hassas çözümleri için kontrol hacimleri duvarlara ve zemine yakın bölgelerde daha küçük oluşturulmuştur. Şekil 4.2 ilk üç çözümde yarım oda akışı için kullanılan ağ yapısını göstermektedir. FLUENT ile elde edilen sonuçlar ve literatür sonuçları Şekil 4.3 ile 4.8 arasında verilmiştir.



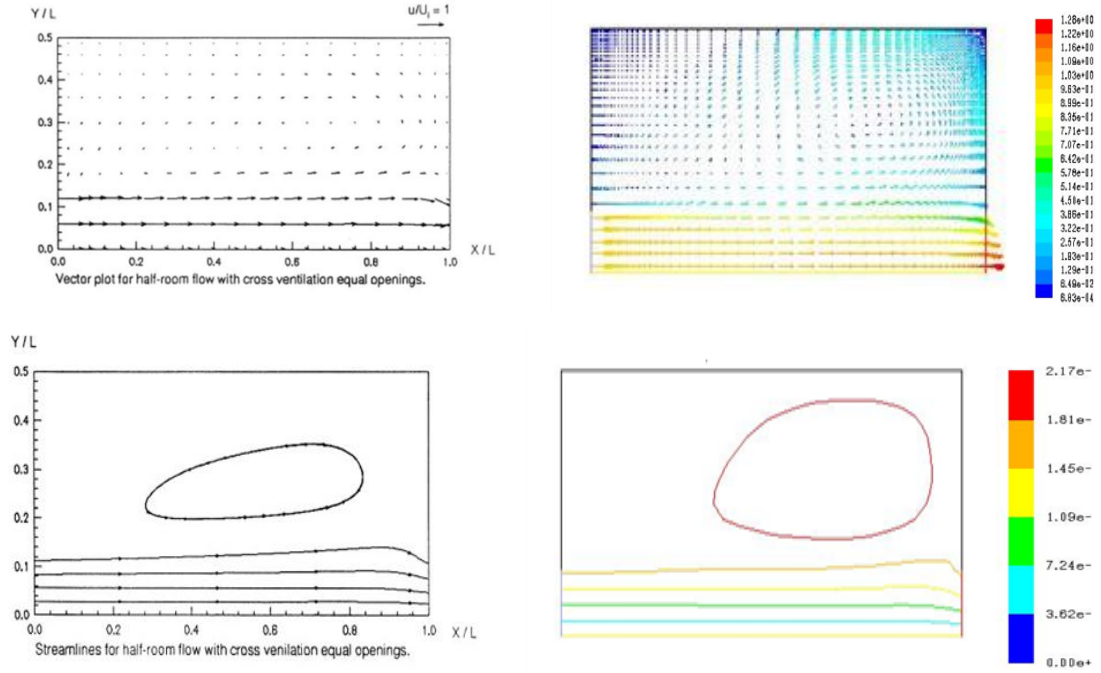


Şekil 4.1. Altı örnekli oda içi akış modeli için konfigürasyon: (1) Çapraz (cross) havalandırma, (2) daha büyük çıkışlı çapraz havalandırma, (3) iki çıkışlı çapraz havalandırma, (4) komşu duvar çıkışlı havalandırma, (5) komşu yüzeylerde en uç nokta giriş-çıkışlı normal havalandırma, (6) 30° giriş rüzgarı ile komşu yüzeylerde en uç nokta giriş-çıkışlı havalandırma.

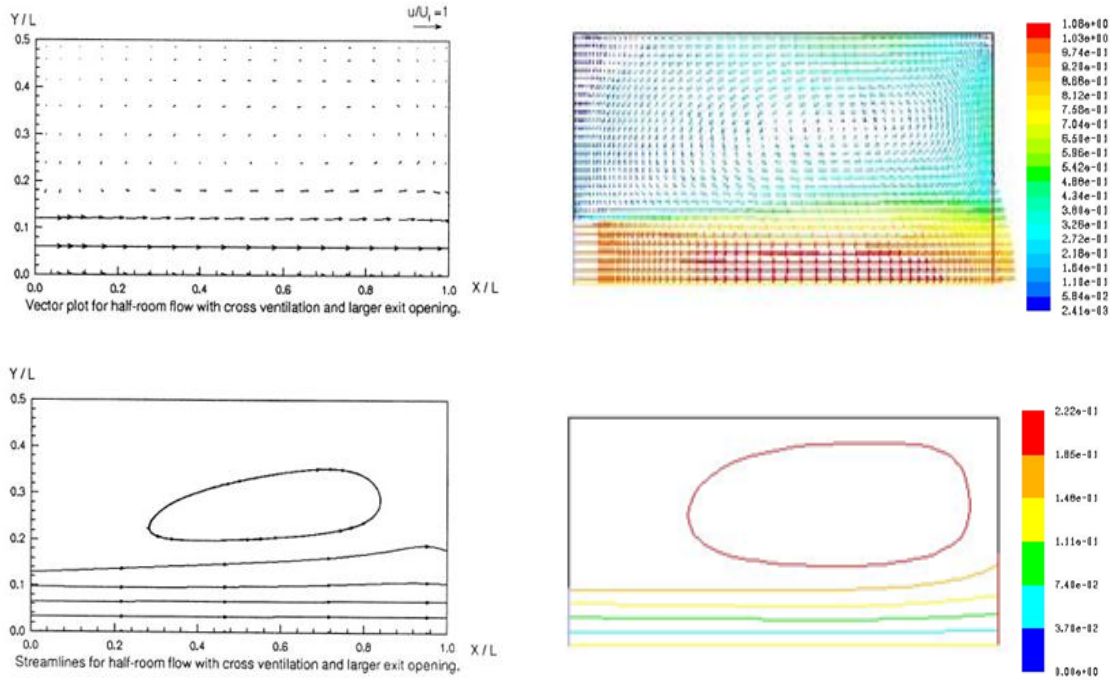


Şekil 4.2. Odanın yarı bölgesinin ağ yapısı.

Şekil 4.3 eşit giriş-çıkışlı çapraz havalandırma için karşılaştırmaları vermektedir. Şekilden de görüleceği gibi sadece dairesel bölgede havalandırma olmaktadır ve literatür ile FLUENT çözümleri uyumludur. Çıkışın duvar alanının % 37.5 una kadar yükseltildiği yani çıkışın girişten % 50 daha büyük alındığı ikinci durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.4 de



Şekil 4.3. Eşit giriş-çıkışlı çapraz havalandırma (birinci durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.

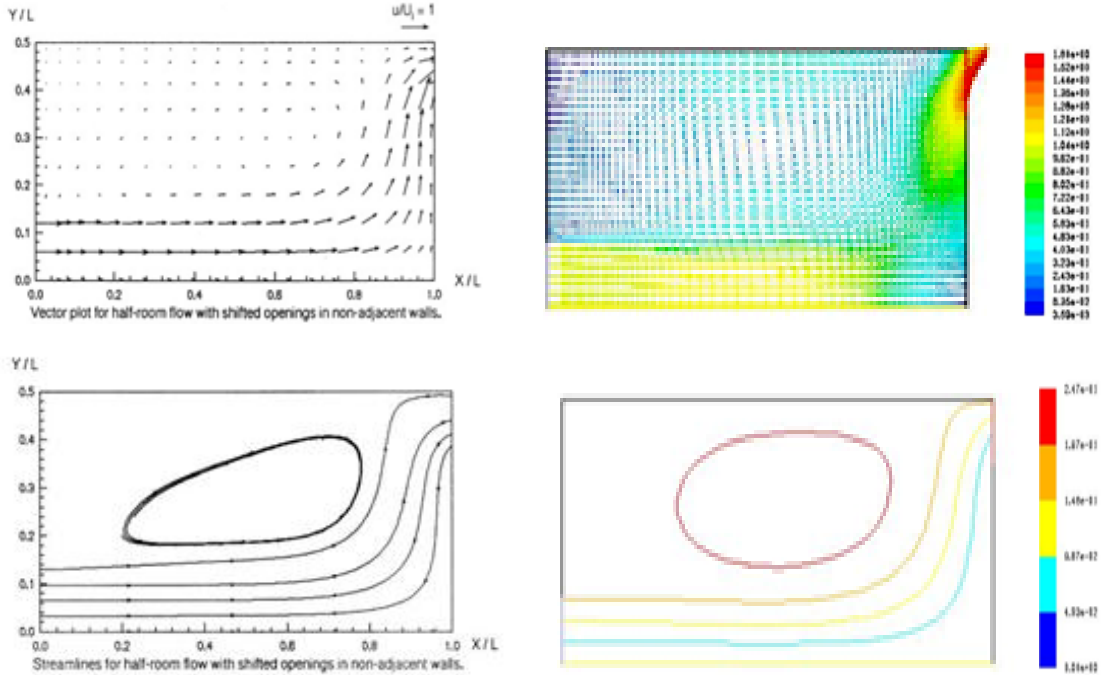


Şekil 4.4. Daha büyük çıkışlı çapraz havalandırma (ikinci durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.

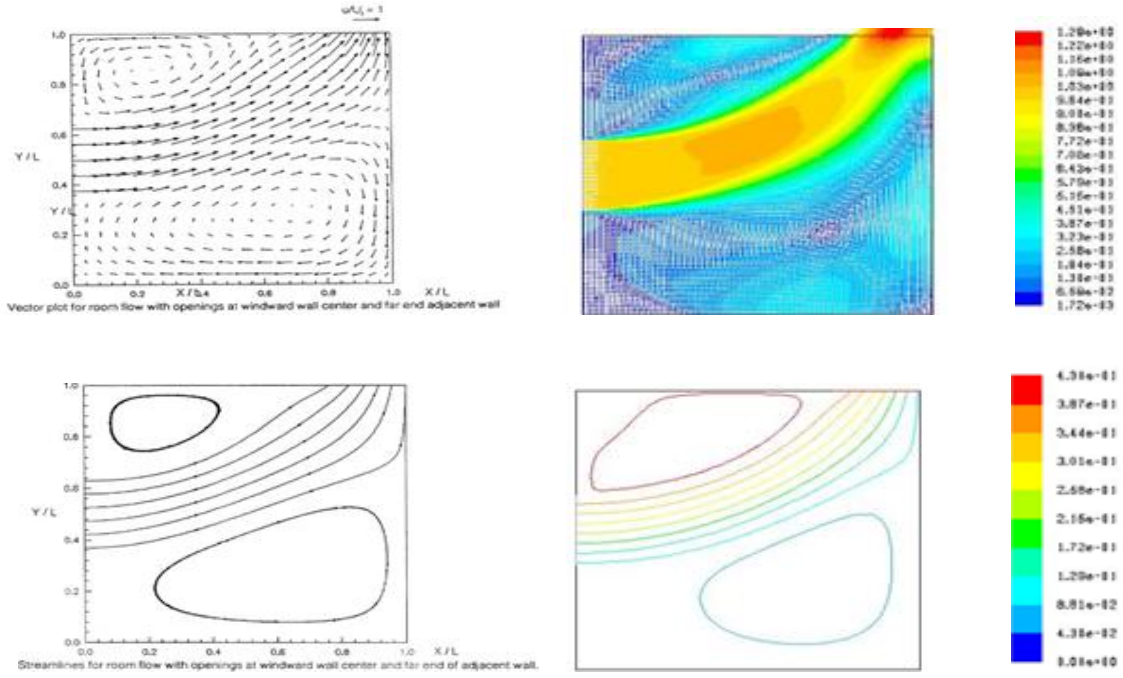
verilmiştir. Bu sefer havalandırılan bölgenin çıkışta daha büyük alana sahip olduğu ve bir yamuğa benzediği görülmektedir. Hava momentum transportunun çoğunlukla türbülans dağılımından ziyade konveksiyon ile yapıldığını vermektedir. Literatür ile FLUENT çözümleri bu modelleme için de uyumludur.

İki çıkışlı havalandırma konveksiyonu vurgulamak için düşünülmüş ve sonuçlar Şekil 4.5 de verilmiştir. Çıkışlar akış kanalının uzunluğunu arttırmak için duvar alanının % 25 ini kapsamaktadır. Şekilden de görüleceği gibi hız vektörlerinde düşündürücü bir artış gözlenirken taze havanın ya da havalandırmanın olmadığı esintisiz bölgenin küçüldüğü dikkati çekmektedir.

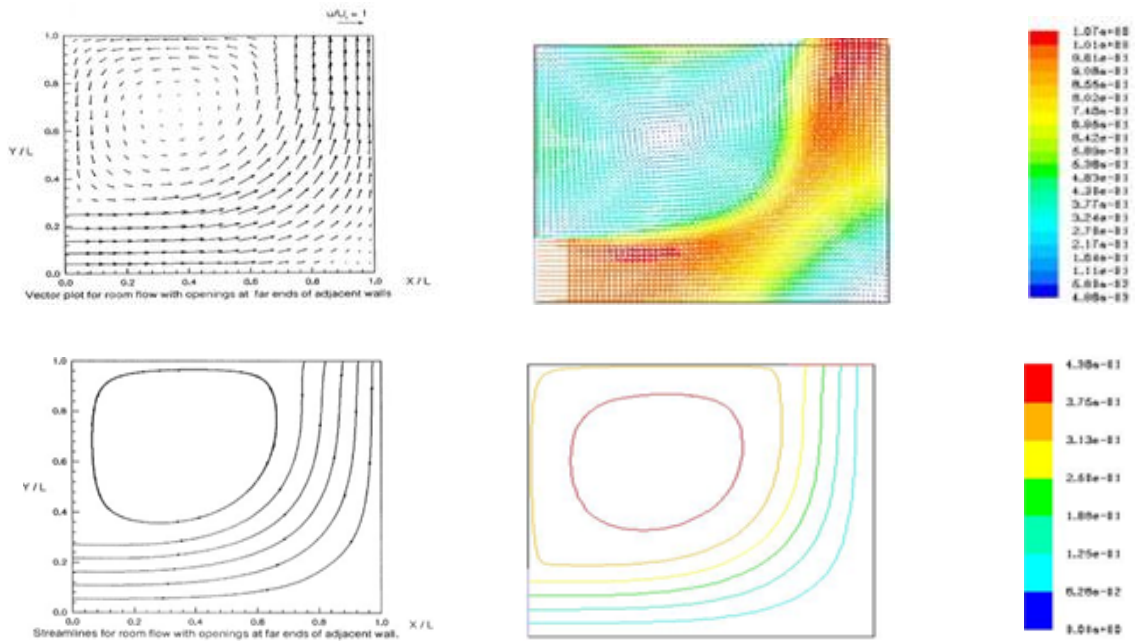
Şekil 4.6 girişin odanın sol duvar ortasında ve çıkışında bitişik duvar sonunda olduğu durum için sonuçları vermektedir. Şekilde ana rüzgâr akış yolunun her iki tarafında yer alan orta büyüklükte iki havalandırma (sirkülasyon) bölgeleri görülmektedir. Hız vektörlerinin özellikle sirkülasyon bölgesi içerisinde fakat bölgenin merkezinden uzakta daha büyük değerde oldukları dikkati çekmektedir. Yine literatür ve FLUENT sonuçları birbirleriyle uyum içerisindedir.



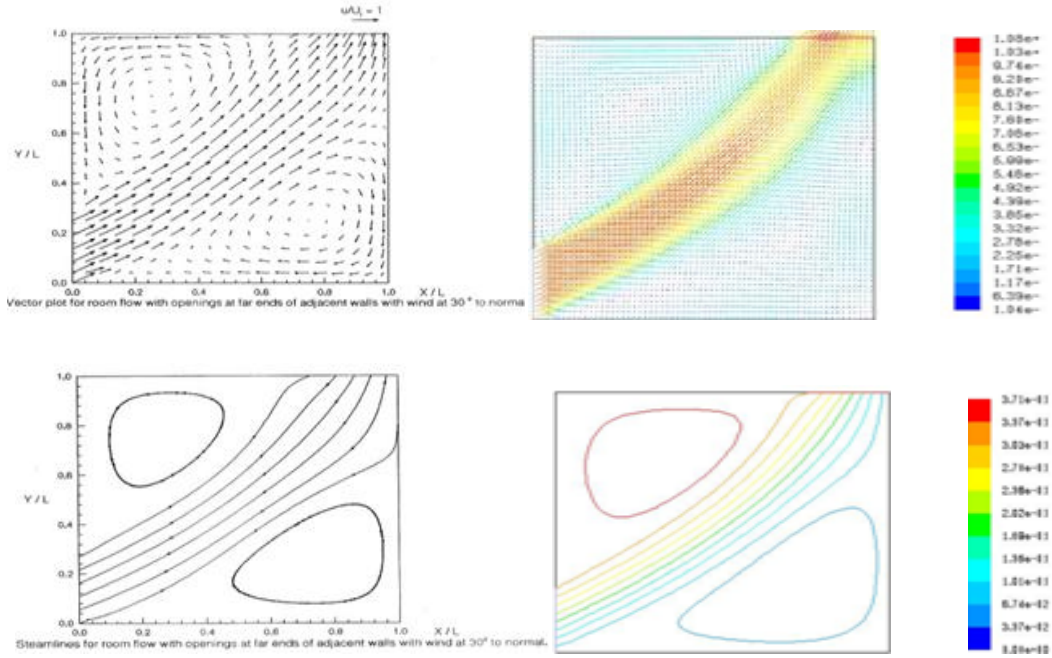
Şekil 4.5. İki çıkışlı çapraz havalandırma (üçüncü durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.



Şekil 4.6. Bitişik duvar çıkışlı havalandırma (dördüncü durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.



Şekil 4.7. Normal rüzgarlı komşu yüzeylerde en uzak giriş-çıkışlı havalandırma (beşinci durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf çalışmada FLUENT sonuçları.



Şekil 4.8.  $30^0$  lik giriş ile bitişik en uzak uç giriş-çıkışlı havalandırma (altıncı durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.

Şekil 4.7 giriş ve çıkışların bitişik duvarların en uzak noktalarında yer aldığı beşinci durum için hız vektörleri ve akış fonksiyonlarını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi bir havalandırma bölgesi büyüdüğünde diğeri küçülmektedir.

Son şekil olan Şekil 4.8 de girişin  $30$  derecelik açı ile verildiği ve çıkışında karşı duvarın sonunda çapraz olarak düşünüldüğü durum için sonuçları vermektedir. Yine iki sirkülasyon bölgesi şekilde çok açık olarak görülmektedir. Fakat bu bölgelerden çıkışa yakın olanı diğere göre daha küçük bir alana sahiptir. Literatür ve FLUENT sonuçları yine birbiriyle uyum içerisinde.

Sonuçlar bize iki denklemlilik türbülans modelin oda içi akış hesaplamaları için çok uygun olduğunu göstermiştir. Kullanılan 6 havalandırma konfigürasyonu içerisinde çapraz havalandırmanın giriş ve çıkış arasındaki en iyi havalandırma verdiğini ve bu yüzden en kullanışlı havalandırma biçimi olduğunu vermiştir. Aynı zamanda oda içindeki insanların var olması durumunda, insanların konumuna bağlı olarak, rüzgârın odaya girme açısının oda içindeki durgun hava bölgesinin azalmasına ve hız büyüklüğünün artmasına neden

olabileceği sonucuna da çıkarılmıştır. FLUENT ile yapılan çözümlerde tüm oda durumları için elde edilen sonuçların literatüre yakın sonuçlar olduğu belirlenmiştir. Bu yüzden FLUENT kodunun bu çalışma için uygun olduğu tespit edilmiştir.

### 4.3. Müze problemi



Şekil 4.9. Çanakkale Arkeoloji Müzesi ve lahitlerin bulunduğu oda.

Bu çalışmada Çanakkale il merkezinde bulunan arkeoloji müzesi içerisindeki lahitlerin bulunduğu oda ele alınarak oda içerisindeki hava akışı ve kirletici parçacıkların odada birikimi çalışılmıştır. Pencere ile yapılan doğal havalandırma yolu ile içerideki hava akışı ve hava ile içeri giren kirletici parçacıkların iç ortam hava kalitesine etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu kirletici parçacıkların lahitlerin çevresindeki etkisi de gözlemlenmiştir.

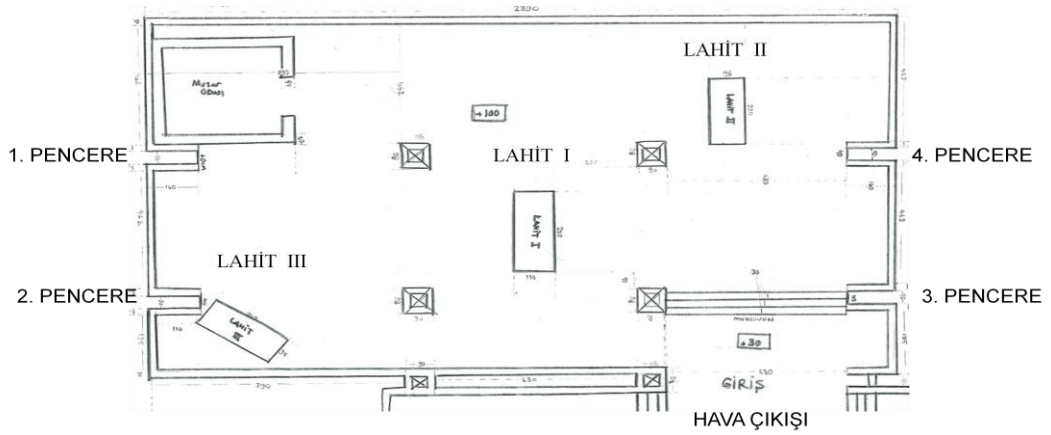
Şekil 4.9 da müzenin giriş ve bahçesi ile lahit odası resimleri görülmektedir. Çok değerli eserlerin sergilendiği müze ve lahitler ile ilgili bilgiler birçok kaynaktan sağlanabilir (gezi-yorum.net, dailymotion.com, 2009). Çalışmanın yapıldığı lahit odasında eski dönemlere ait üç tane lahit ve kral mezarlığı bulunmaktadır. Şekil 4.10 ile gösterilen iki lahitten biri Polyksena lahiti, diğeri ise Altıkulaç lahiti. Odada bulunan diğer lahitin kime ait olduğu bilinmemektedir.



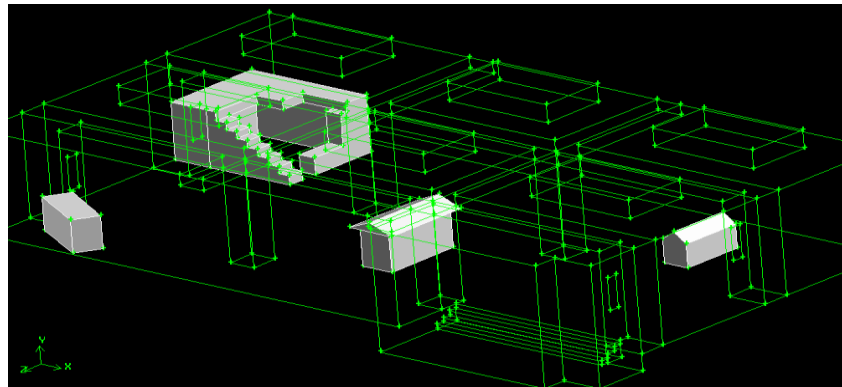
Şekil 4.10. Odada sergilenen lahitler. Polyksena lahiti (üst) ve Altıkulaç lahiti (alt) .

### 4.3.1. Geometri

Müze yönetiminden temin edilen lahit odasına ait planın çizimi Şekil 4.11 de verilmektedir. GAMBİT ile oluşturulan ve çözüm için kullanılan geometri Şekil 4.12 de ve yine GAMBİT de oluşturulan çözüm ağı da Şekil 4.13 de gösterilmiştir. Çözüm ağı ve problemin çözümleri için yüksek performanslı çözüm platformları (süper bilgisayarlar) kullanılmıştır. Çözümde yaklaşık on üç milyon kontrol hacmi oluşturulmuştur. Çözüm için model yirmi eş parçaya bölünmüş ve FLUENT programına aktarılmıştır.

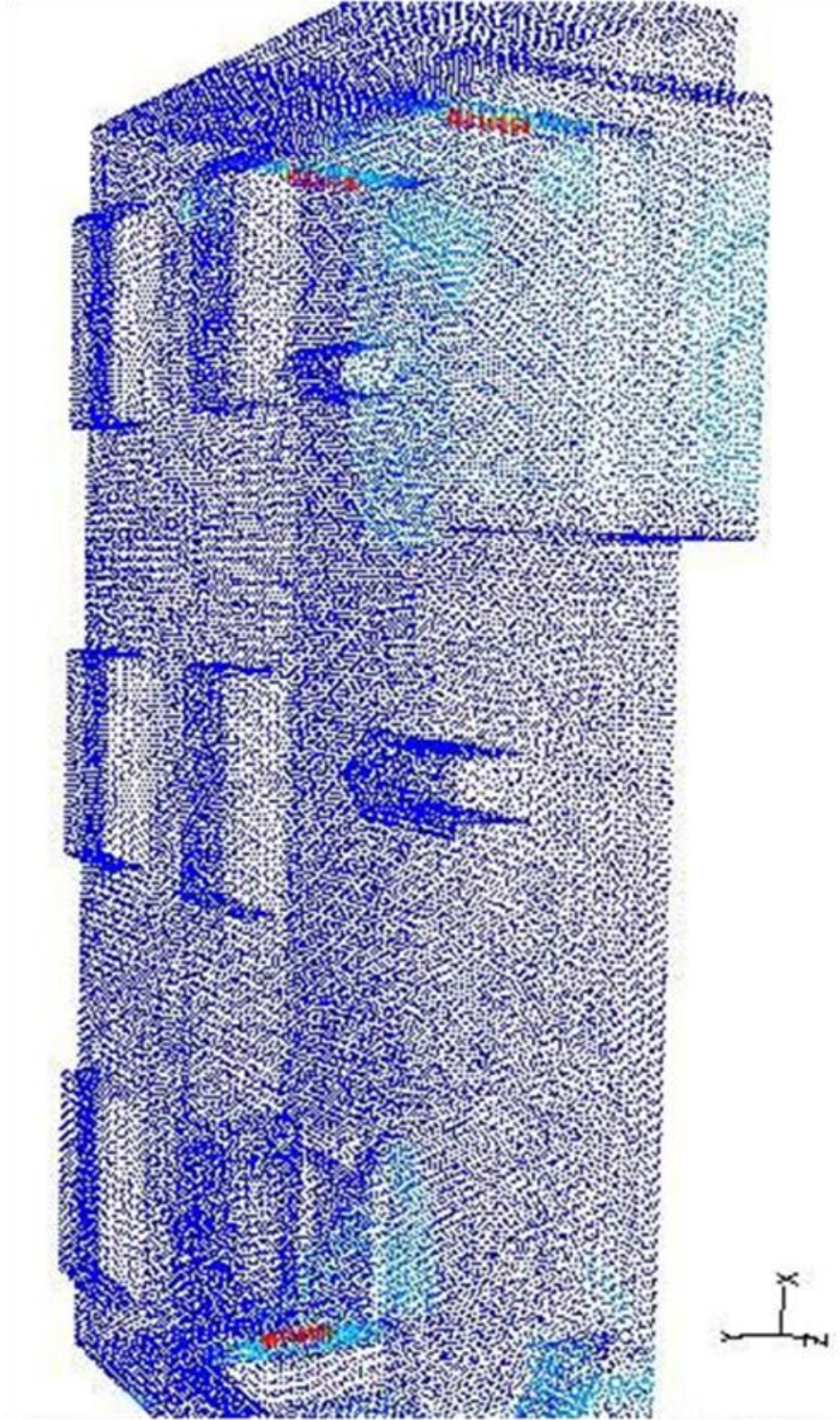


Şekil 4.11. Lahit odası planı.



Şekil 4.12. Gambit ile lahit odası modeli.





Şekil 4.13. Müzenin ağ yapılandırması

### 4.3.2. Sınır koşulları

Çözüm için önce kullanılacak olan nümerik yöntem seçilmiş ve buna bağlı olarak denklemlerde kullanılan sabitler FLUENT'e girilmiştir. Akışkan olarak hava seçilmiş ve havanın özellikleri program içinde yeniden düzenlenmiştir. Akışkanın pencerelerden giriş hızı, müze ve benzeri kapalı ortamlara verilmesi gereken hava miktarının belirlenmesi ile hesaplanmıştır (Doğan, 2006). Çalışmanın mümkün bütün durumları kapsamı amacıyla dört pencerenin farklı açılma kombinasyonları göz önüne alınarak her bir durum için hız değerleri tanımlanmış ve Çizelge 4.1 ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Dört farklı pencere durumu için hız değerleri.

	1. Pencere	2. Pencere	3. Pencere	4. Pencere
1. Durum	0,487 m/s	0,487 m/s	kapalı	kapalı
2. Durum	kapalı	kapalı	0,487 m/s	0,487 m/s
3. Durum	kapalı	0,487 m/s	kapalı	0,487 m/s
4. Durum	0,487 m/s	kapalı	0,487 m/s	kapalı

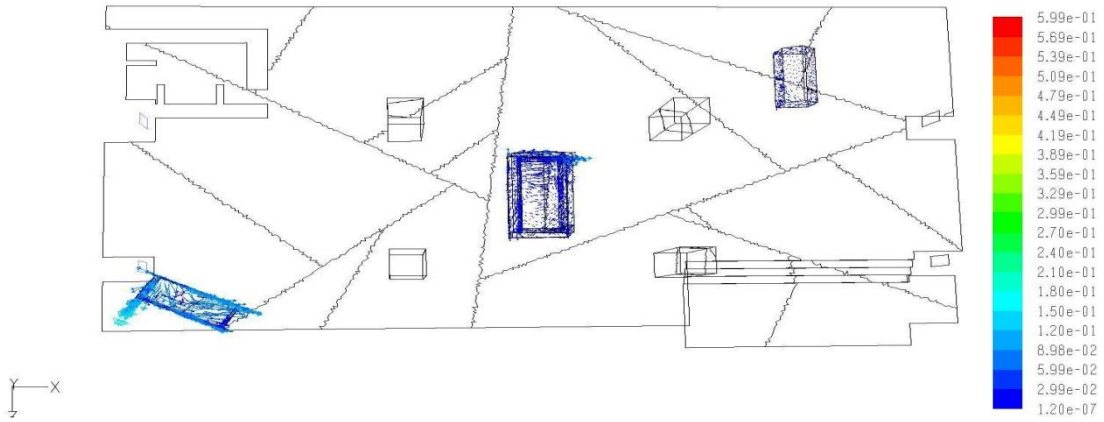
Programda hava girişinin olduğu pencereler velocity inlet, çıkış ise pressure outlet olarak tanımlanmış ve hız değerleri yazılmıştır. Bütün duvar ve lahit yüzeylerinde akışkanın hızı sıfır olarak alınmıştır. Havanın giriş noktasında hız ve basınç sabittir. Pressure outlet bölgesi atmosfere açıldığından basınç değeri için atmosfer basıncı (101,325 Pa) girilmiştir. Basınç alanı hesabı için yaygın olarak kullanılan SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması kullanılmıştır. Çözüm için ikinci derece yaklaşım (second order upwind) kullanılmış, yakınsama kriterinin süreklilik denklemi için  $10^{-5}$ , hızlar için  $10^{-6}$ ,  $k$  ve  $\epsilon$  için ise  $10^{-6}$  oranında farka ulaşması esas alınmıştır. Ayrıca giriş ve çıkışın kütleli debileri arasındaki farkın  $10^{-10}$  oranına ulaşması halinde çözümün yakınsadığı öngörülmüştür. Çözüm her bir durum için yaklaşık olarak 55 dakika sürmüştür.

Parçacık dağılımı için 1, 10 ve 100 mikron büyüklüğündeki kalsiyum karbonat ve kükürt parçacıkları incelenmiştir. Bu parçacıklar ortama her bir durum için akış içerisinde aynı sayıda gönderilmiştir. Parçacıkların akışkan ile aynı hızda hareket ettiği kabul

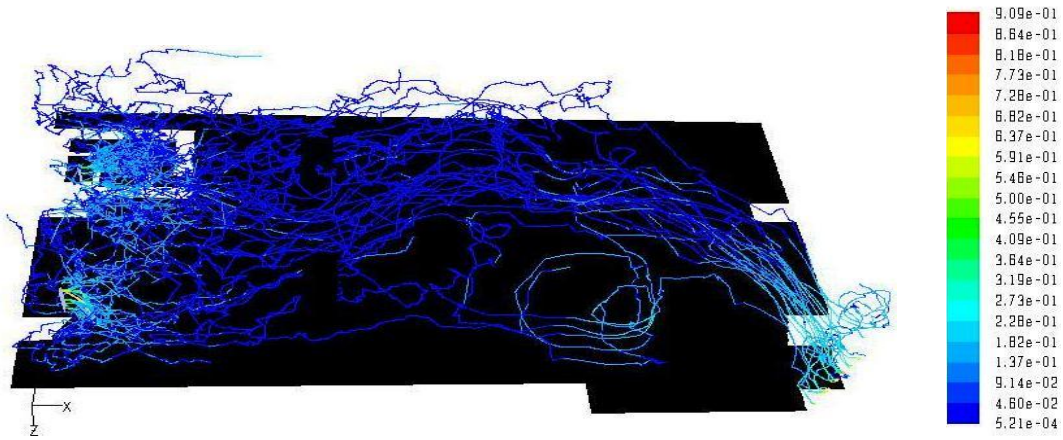
edilmiştir. Giriş ve çıkış noktalarında parçacıkların serbest kaldığı veya kaçtığı (escaped), diğer tüm yüzeylerde ise yakalandığı (trapped) varsayılmıştır.

#### 4.4. Sonuçlar

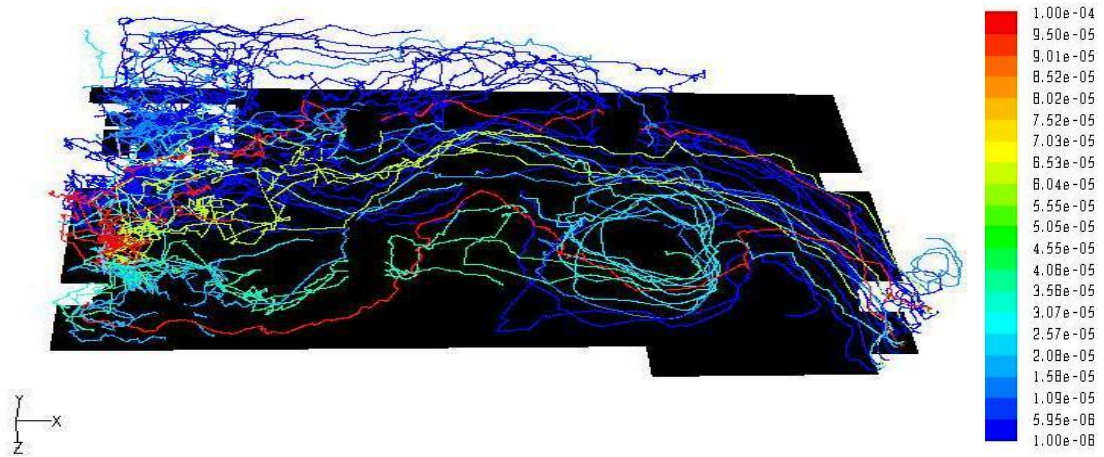
Bu bölümde yukarıda bahsedilen dört farklı durum için oda içerisinde elde edilen sonuçlar sırasıyla; hız vektörleri, parçacığın hız ve yarıçapına bağlı olarak izlediği yollar ile odadaki yüzeylerde ve lahitlerde parçacıkların birikimi olarak verilmiştir.



Şekil 4.14. Birinci durum için lahitler çevresindeki hız vektörlerinin büyüklükleri (m/s)

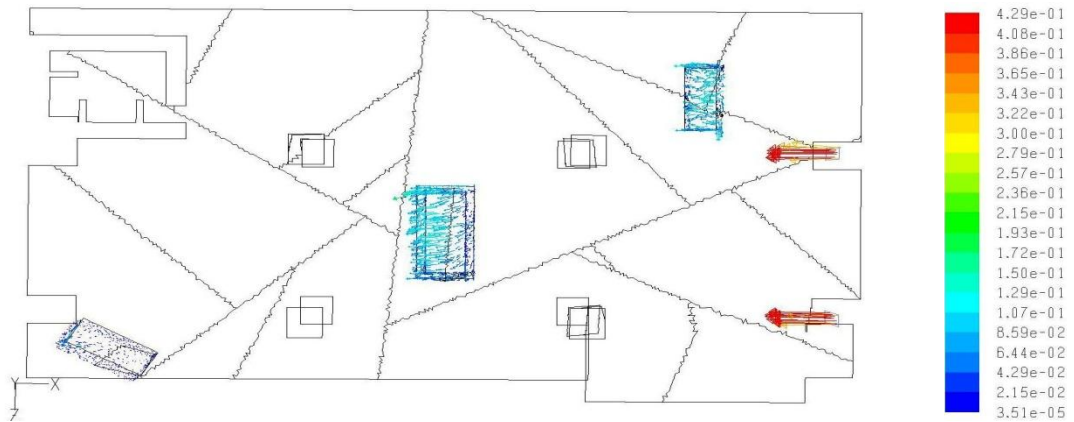


Şekil 4.15. Birinci durum için parçacıkların hızına bağlı parçacığın izlediği yol. Açılı görünüm. (m/s).

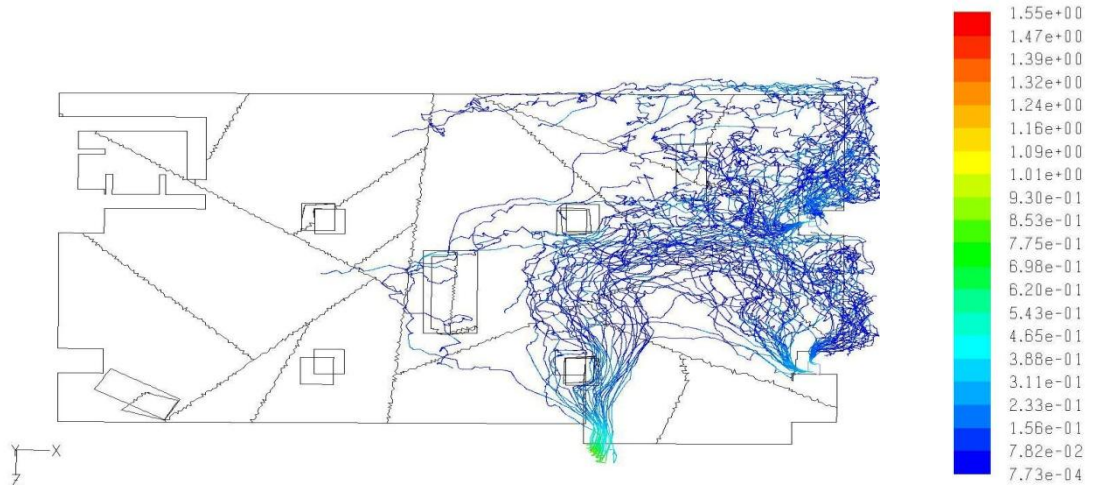


Şekil 4.16. Birinci durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol. Açılı görünüm.

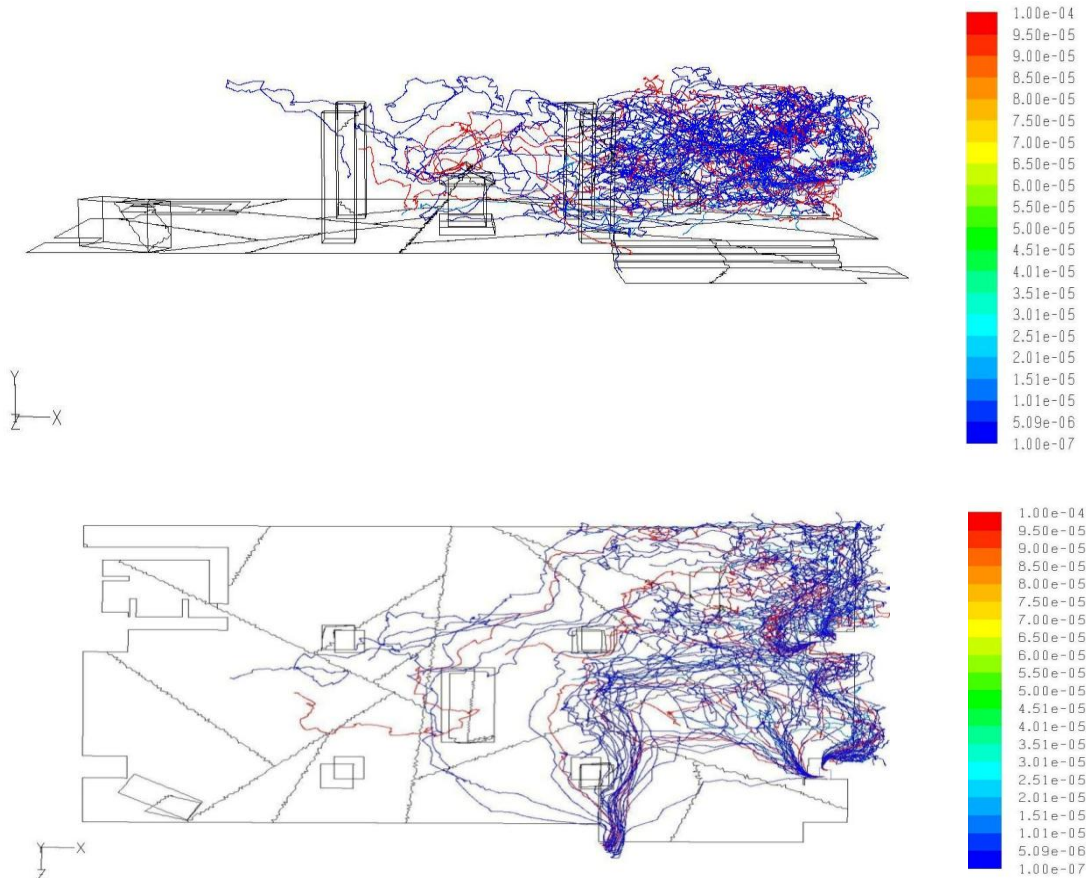
Durum 1 (sol taraf, aynı yüzeyde açık pencereler) için elde edilen sonuçlar şekiller 4.14-4.16 arasında verilmiştir. Şekil 4.16, parçacığın yarıçapına bağlı izlediği yolu vermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi zararlı kabul edilen 100 mikron yarıçapındaki ağır parçacıklar ortamda fazla hareket edememektedir. Çoğunlukla 1 ve 10 mikron yarıçaplı parçacıkların hareket halinde olduğu görülmektedir.



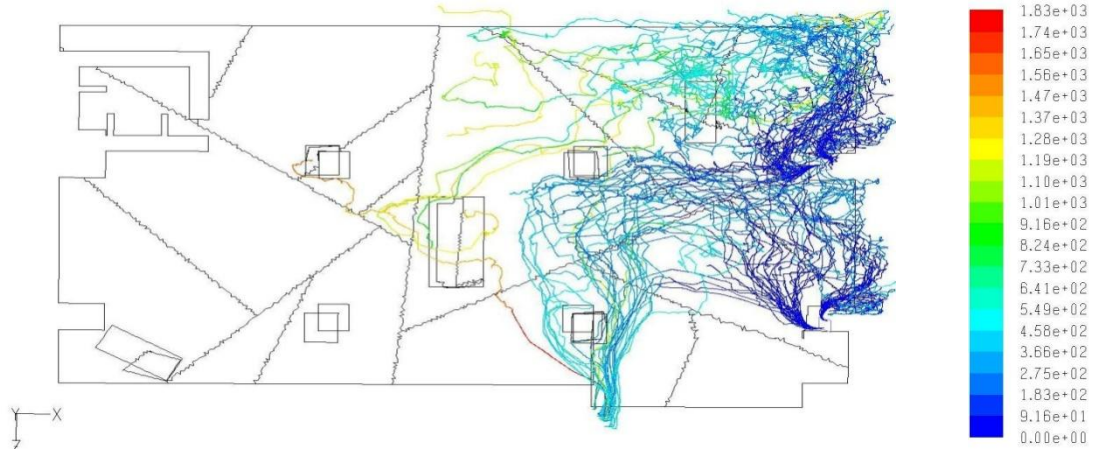
Şekil 4.17. İkinci durum için lahitler çevresindeki hız vektörlerinin büyüklükleri (m/s).



Şekil 4.18. İkinci durum için parçacıkların hızına bağlı parçacığın izlediği yol. Üstten görünüm. (m/s).



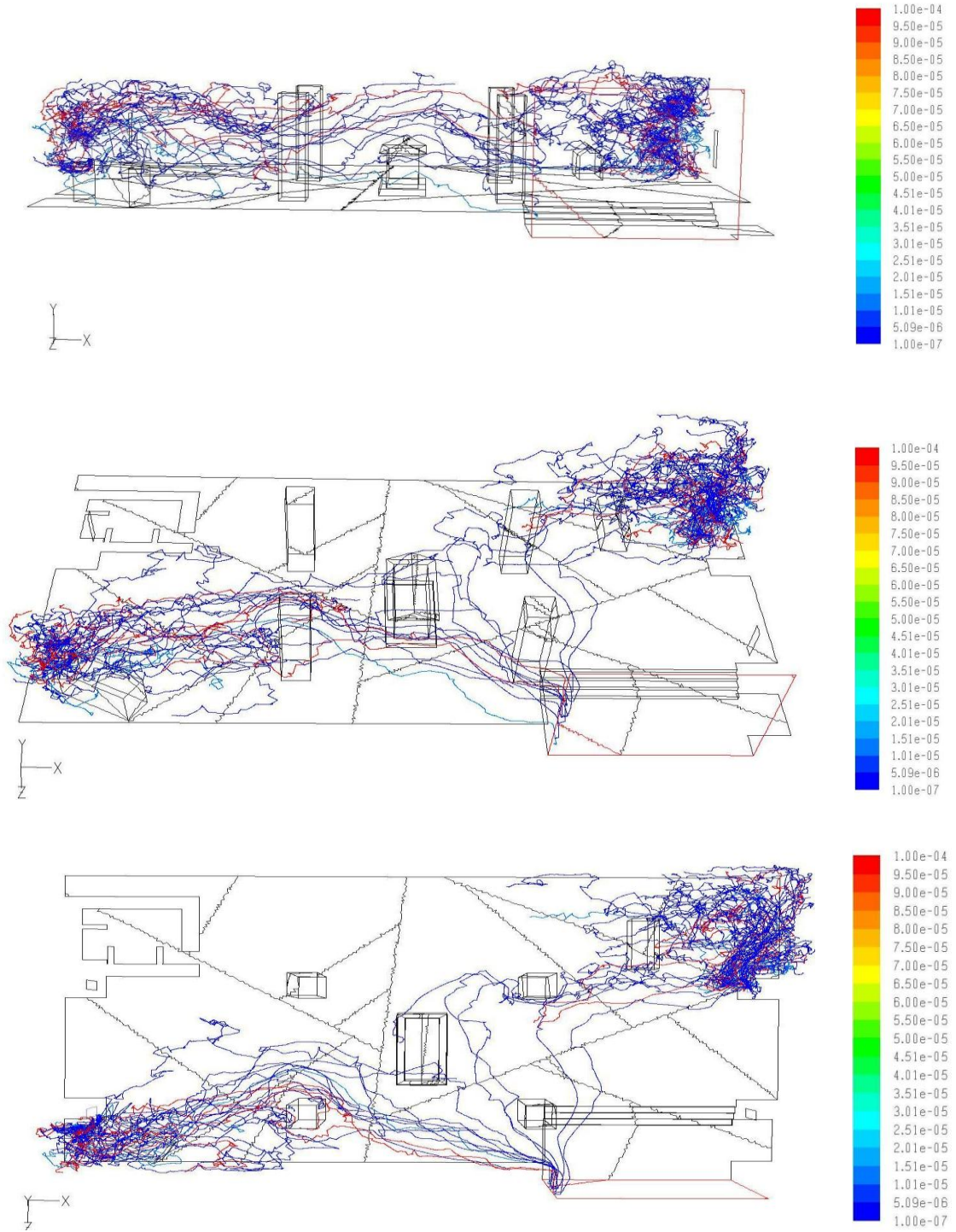
Şekil 4.19. İkinci durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol. Yandan görünüm (üst) ve üstten görünüm (alt).



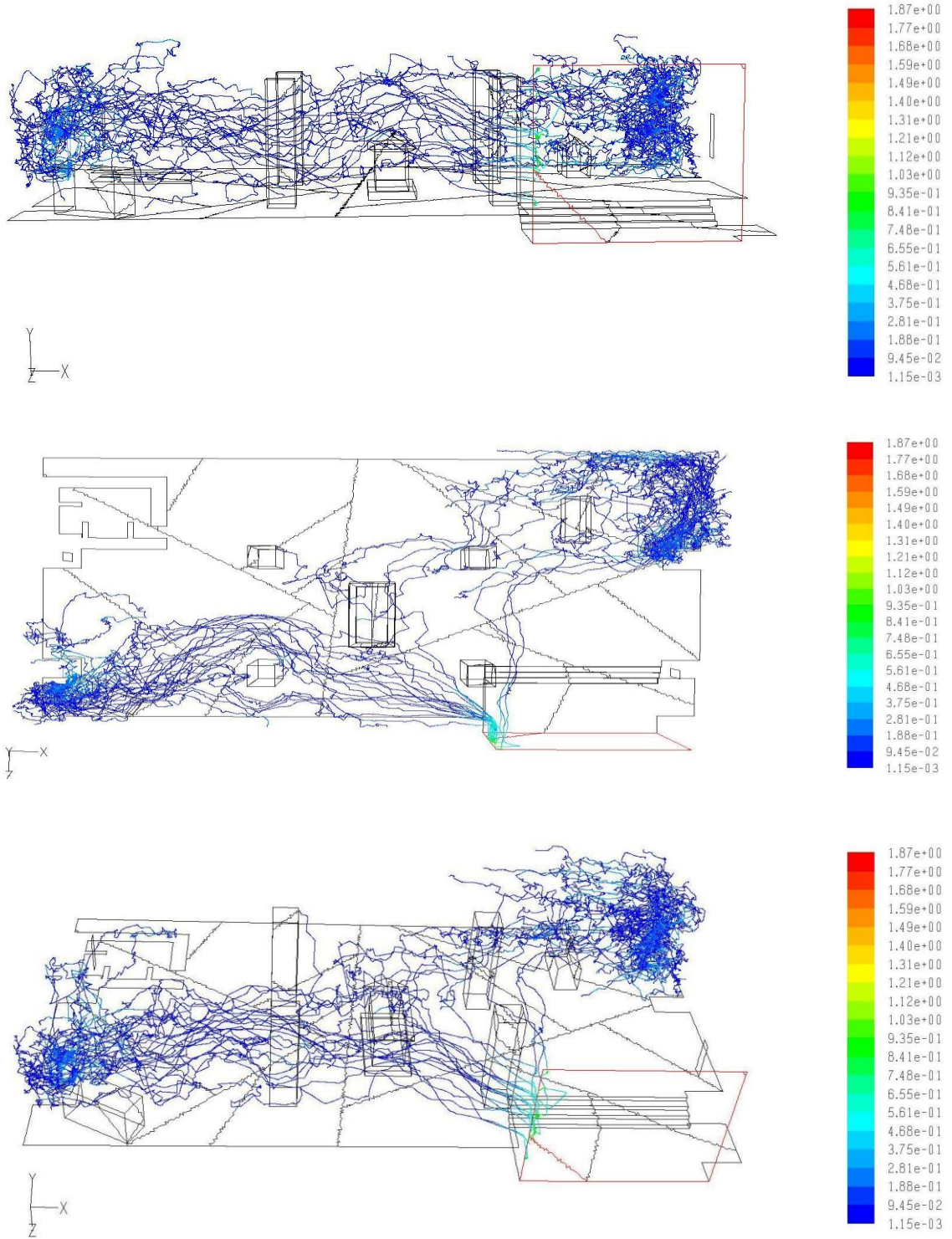
Şekil 4.20. İkinci durum için parçacıkların kalma sürelerine bağlı parçacığın izlediği yol. Üstten görünüm. (s).

Durum 2 (sağ taraf, aynı yüzeyde açık pencereler) için elde edilen sonuçlar Şekil 4.17 ile 4.20 arasında farklı parametreler için verilmiştir. Şekil 4.18 ile verilen parçacıkların hız grafiğinden parçacıkların bu durum için neredeyse müzenin yarı bölümünden ileriye geçemedikleri gözlenmektedir. Şekil 4.20 incelendiğinde parçacıkların daha çok çıkış bölgesine yakın yerlerde bulunduğu görülmektedir.

Durum 3 de çapraz havalandırma yapılmış; 2 ve 4 nolu pencereler açılıp diğer pencereler kapatılarak parçacıkların hareketi incelenmiştir. Bu durum için parçacığın hızı ve yarıçapına bağlı olarak izledikleri yollar ve hız vektörlerinin dağılımı sırasıyla Şekil 4.21 ile 4.23 arasında verilmektedir. Tüm şekiller incelendiğinde çapraz havalandırma durumunda parçacıkların daha çok 4 nolu pencere civarında toplandıkları görülmektedir.



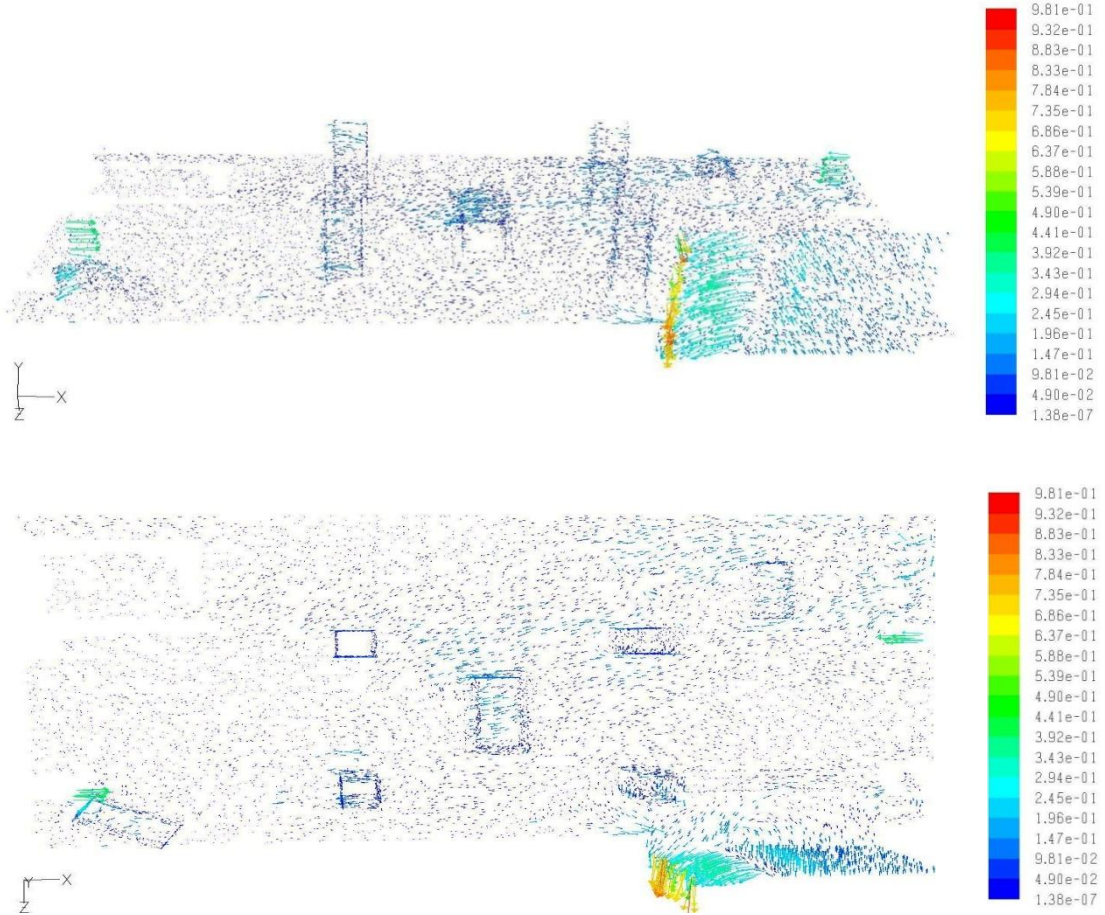
Şekil 4.21. Üçüncü durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol. Yandan görünüm (üst), açılı görünüm (orta) ve üstten görünüm (alt).



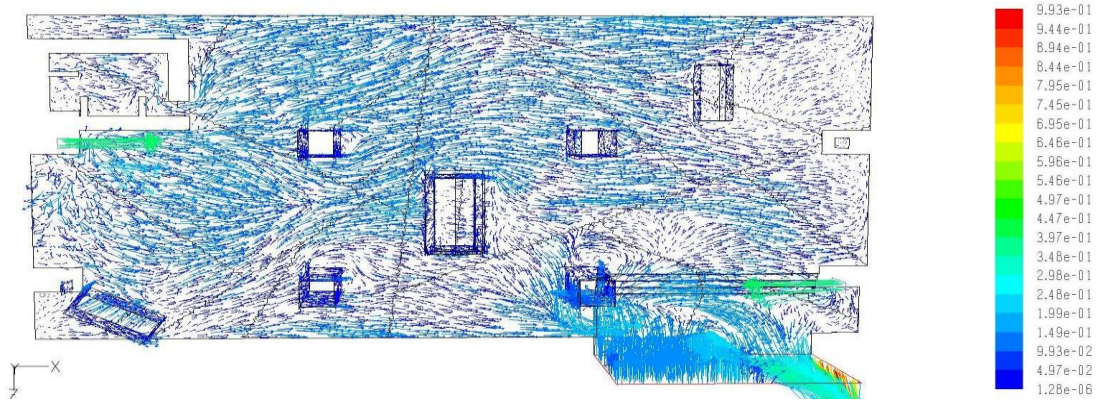
Şekil 4.22. Üçüncü durum için parçacıkların hızına bağlı parçacığın izlediği yol (m/s).  
Yandan görünüm (üst), üstten görünüm (orta) ve açılı görünüm (alt).



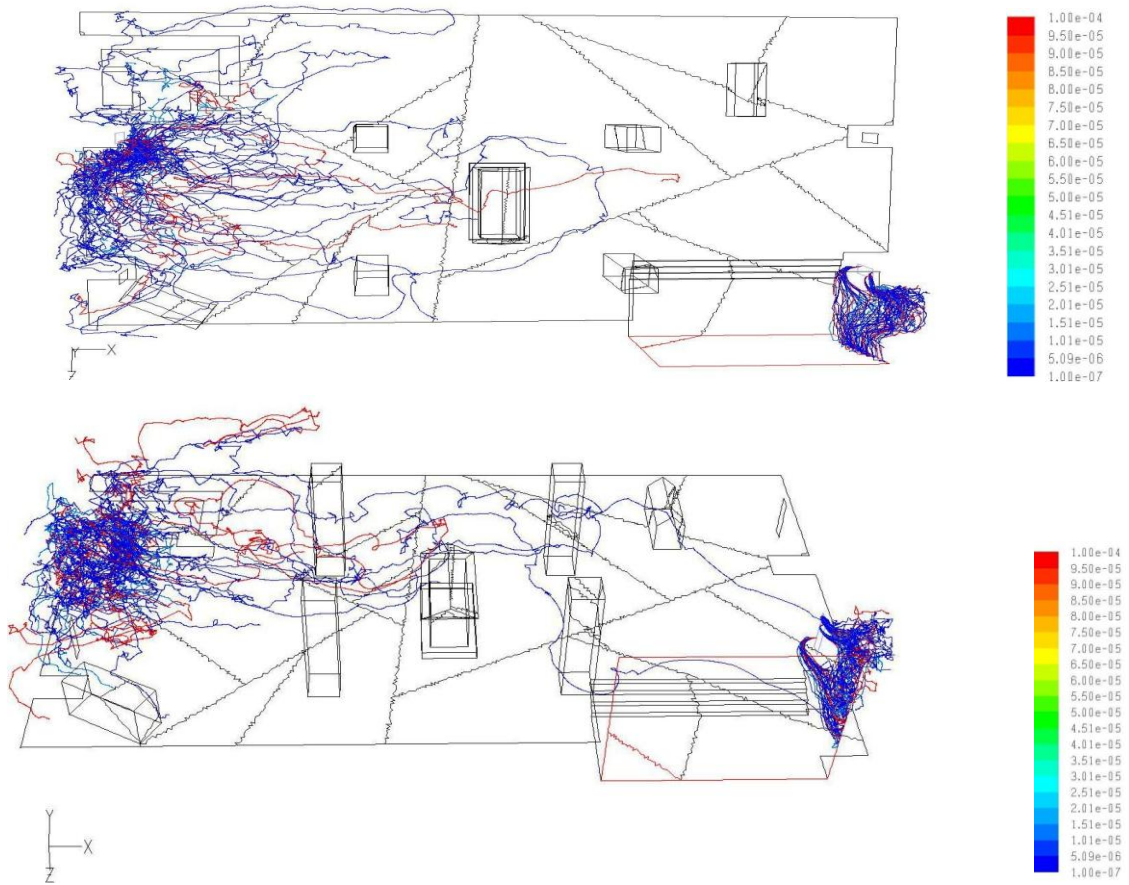
Durum 4 de 1 ile 3 no'lu pencereler arasında çapraz havalandırma yapılmış; 1 ve 3 no'lu pencereler açılıp, 2 ve 4 nolu pencereler kapatılarak parçacıkların hareketi incelenmiştir. Bu durum için parçacığın hızı ve yarıçapına bağlı olarak izledikleri yollar ve hız vektörlerinin dağılımı sırasıyla Şekil 4.24 ile 4.27 arasında verilmektedir. Bu durum için elde edilen grafiklere bakıldığında parçacıkların birçoğunun çıkış bölgesinden (pencere 1) kaçtığı görülmektedir.



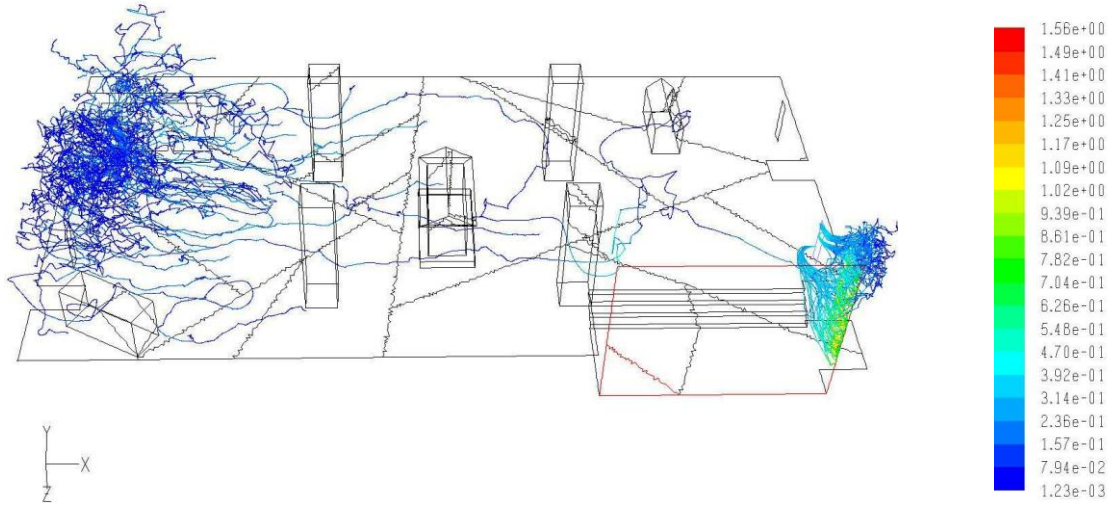
Şekil 4.23. Üçüncü durum için akışkanın hız vektörlerinin büyüklükleri (m/s). Açılı görünüm (üst), üstten görünüm (alt).



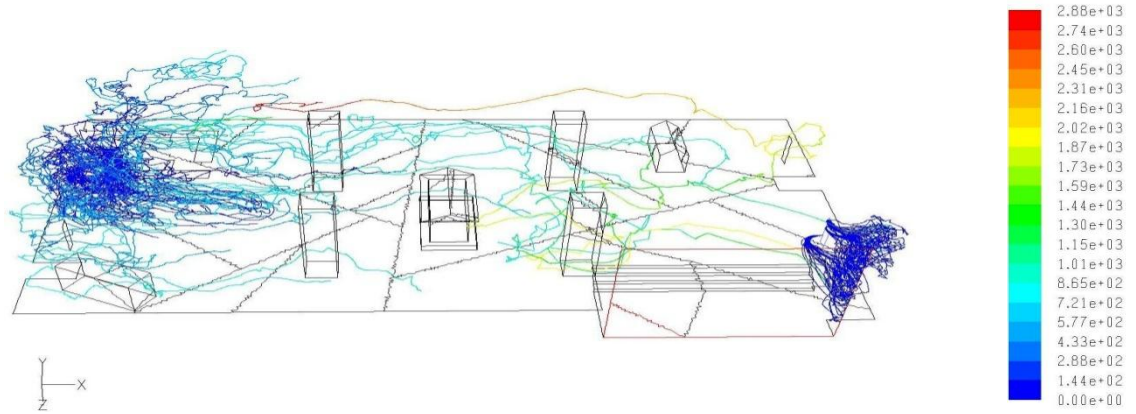
Şekil 4.24. Dördüncü durum için akışkanın hız vektörlerinin büyüklükleri (m/s). Üstten görünüm.



Şekil 4.25. Dördüncü durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol. Üstten görünüm (üst), açılı görünüm (alt).



Şekil 4.26. Dördüncü durum için parçacıkların hızına bağlı parçacığın izlediği yol. Açılı görünüm. (m/s).



Şekil 4.27. Dördüncü durum için parçacıkların kalma sürelerine bağlı parçacığın izlediği yol. Açılı görünüm. (m/s).

Akış ile ortama gönderilen parçacıkların her bir havalandırma durumu için lahit odası içerisindeki dağılımları Çizelge 4.2 de gösterilmektedir. Tablolarda ortama salınan parçacık sayısı, parçacıkların lahit ve yüzeylerdeki birikim miktarı (parçacık sayısı) ve odada kalma zamanları verilmektedir.

Çizelge 4.2. Sırasıyla dört farklı havalandırma durumu için lahit odasında parçacıkların dağılımı.

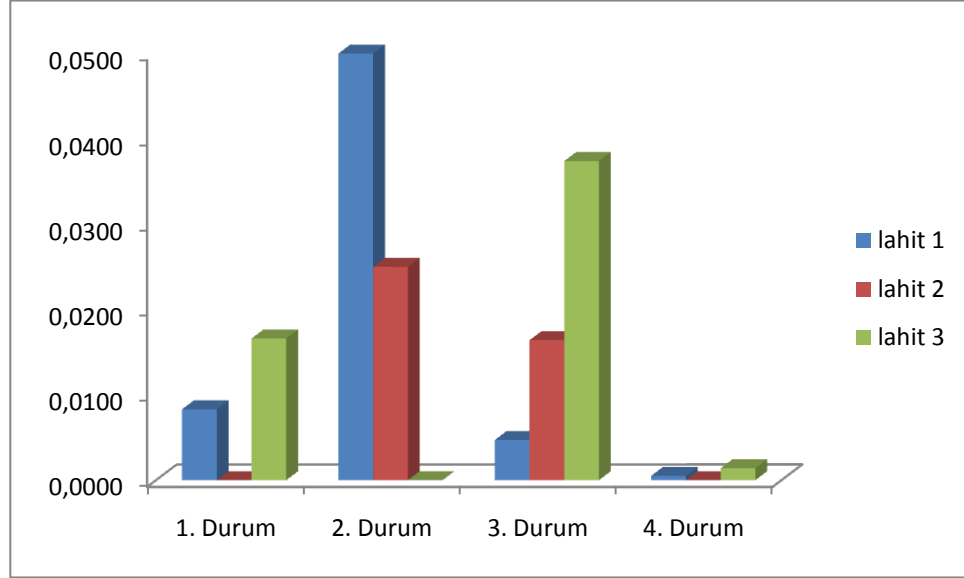
Fate	Number	Elapsed Time (s)				Injection, Index	
		Min	Max	Avg	Std Dev	Min	Max
Tamamlanmayan	22	1,54e+02	1,96e+03	5,84e+02	4,70e+02	153	153
Lahit 1	6	2,44e+02	1,20e+03	5,85e+02	3,28e+02	153	51
Lahit 2	3	8,87e+01	4,44e+02	2,81e+02	1,47e+02	51	0
Tavan yüzeyi	17	4,78e+01	1,68e+03	3,90e+02	3,94e+02	0	51
Yan yüzeyler	51	5,23e+00	1,12e+03	2,48e+02	2,18e+02	0	102
Taban yüzeyi	17	5,74e+01	5,70e+03	2,69e+02	1,54e+02	153	51
Diğer yüzeyler	4	3,44e+02	9,50e+02	5,06e+02	2,57e+02	153	102

Fate	Number	Elapsed Time (s)				Injection, Index	
		Min	Max	Avg	Std Dev	Min	Max
Tamamlanmayan	827	1,98e+01	4,72e+03	5,79e+02	3,72e+05	93	98
Lahit 1	24	2,21e+02	2,36e+03	7,73e+02	4,97e+05	137	105
Lahit 2	84	5,17e+01	2,11e+03	3,04e+02	3,42e+05	166	153
Lahit 3	191	1,65e+00	1,28e+03	9,50e+01	1,70e+05	0	88
Tavan yüzeyi	713	1,73e+01	5,18e+03	3,86e+02	3,83e+05	121	178
Yan yüzeyler	2036	9,15e-01	3,83e+03	2,65e+02	3,24e+05	0	86
Taban yüzeyi	1018	1,87e+01	6,14e+03	2,84e+02	3,23e+05	30	169
Diğer yüzeyi	203	1,42e+02	2,57e+03	5,00e+02	3,74e+05	131	158

Fate	Number	Elapsed Time (s)				Injection, Index	
		Min	Max	Avg	Std Dev	Min	Max
Tamamlanmayan	1029	1,19e+01	2,14e+03	4,58e+01	1,68e+05	131	65
Lahit 1	3	3,82e+02	1,17e+03	6,88e+02	3,45e+05	20	5
Lahit 3	8	4,49e+02	1,33e+03	7,52e+02	2,52e+05	59	27
Tavan yüzeyi	451	2,83e+01	2,89e+03	5,20e+02	5,07e+05	86	25
Yan yüzeyler	3139	2,05e+01	2,21e+03	9,54e+01	2,02e+05	166	180
Taban yüzeyi	844	1,47e+01	2,22e+03	1,85e+02	2,28e+05	3	38
Diğer yüzeyler	31	7,79e+01	1,99e+03	7,11e+02	4,62e+05	2	22

Fate	Number	Elapsed Time (s)				Injection, Index	
		Min	Max	Avg	Std Dev	Min	Max
Tamamlanmayan	10	1,08e+03	2,10e+03	1,55e+03	3,55e+02	201	1608
Lahit 1	1	8,25e+02	8,25e+02	8,25e+02	0,00e+00	1206	1206
Lahit 3	2	7,21e+00	7,84e+00	7,53e+00	3,15e-01	1407	1407
Tavan yüzeyi	15	4,85e+01	2,23e+03	7,75e+02	6,13e+02	1809	804
Yan yüzeyler	38	7,75e+00	3,58e+03	5,40e+02	8,49e+02	0	804
Taban yüzeyi	54	4,02e+00	2,21e+03	2,16e+02	4,58e+02	1809	402

Dört havalandırma durumu için özellikle lahitler çevresindeki parçacık birikim oranları yakalanılan parçacık sayısının toplam parçacık sayısına bölümü ile hesaplanarak Şekil 4.28 de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Dört farklı havalandırma durumu için lahitlerin çevresindeki parçacık birikim oranları

Şekil 4.28'e göre dördüncü durumda yani 1 ve 3 no'lu pencereler arasındaki çapraz havalandırma da lahitler üzerindeki parçacık birikimi minimum düzeyde kalmaktadır. Yani 2 ve 4 nolu pencerelerin kapalı olduğu durum lahitler açısından en iyi durumdur.

## BÖLÜM 5

### TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Çanakkale Arkeoloji Müzesi lahit odası içerisindeki hava akışı hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerini çözen ve ticari bir yazılım olan FLUENT kodu kullanılarak modellenmiştir. Modellemenin amacı hava akışı ile ortama salınan kirletici parçacıkların oda içerisindeki dağılımının incelenmesi ve aynı zamanda lahitlerdeki parçacık birikiminin belirlenmesidir. Lahit odasında bulunan dört pencere ile odanın doğal havalandırması göz önüne alınmış ve dört farklı pencere durumları için hava akışı hesaplanmıştır. Lahit odasının geometrik modeli ve çözüm için gerekli ağ yapısı FLUENT ile kombine çalışan GAMBİT ön-işlemcisi ile oluşturulmuştur. Hesaplamalar iki denklemlili  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanılarak yapılmıştır. Ortama salınan kirletici parçacıklar olarak 1, 10, 100 mikron büyüklüğündeki kükürt ve kalsiyum karbonat parçacıkları seçilmiştir. Bu parçacıkların lahitlere vereceği zararı minimuma indirmek için en uygun havalandırma (pencere) kombinasyonu belirlenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir;

- Öncelikle kullanılan FLUENT kodunu test etmek amacıyla literatürden seçilen örnek problem sonuçları ile FLUENT sonuçlarının uyum içerisinde olduğu bulunmuş ve FLUENT' in kapalı ortamlardaki havanın nümerik simülasyonu için uygun olduğu görülmüştür.
- 100 mikron büyüklüğündeki ağır ve zararlı kabul edilebilecek parçacıkların tüm havalandırma durumları için diğer 1 ve 10 mikron yarıçaplı parçacıklara nazaran ortamda daha az hareket ettikleri gözlemlenmiştir.
- Doğal havalandırma için en uygun kombinasyonun birinci durum (sol taraf, aynı yüzeyde açık pencereler) olduğu belirlenmiştir.
- Üçüncü durum (2 ve 4. cü pencereler arası çapraz havalandırma) için lahitler çevresindeki parçacık birikiminin maksimum olduğu görülmüş bu sebeple pencerelerin bu konumda açılmasıyla lahitler üzerinde biriken parçacıkların zararlarının diğer pencere durumlarına göre daha fazla olacağı belirlenmiştir.

- Lahitlerin kirletici parçacıklardan görebileceği olumsuz etkileri minimuma indirmek için kullanılması gereken pencere kombinasyonunun dördüncü durum (1 ve 3 no'lu pencereler arasındaki çapraz havalandırma) olduğu görülmüş ve doğal havalandırma olarak bu kombinasyonun kullanılması gerektiği önemle vurgulanmıştır.

Bu çalışma ile ülkemizde çok değerli tarihi ve sanatsal eserlerin sergilendiği müzelerde hava kirleticilerin eserlere etkisi hakkında daha fazla araştırmalar yapılmasının gerekliliği görülmüş, bu araştırmaların sonucunda yönergelerle yaptırım uygulanarak bir Risk Durum İndeksinin oluşturulmasının elzem olduğu tekrardan önemle vurgulanmıştır.

## KAYNAKLAR

- Anderson J.D., 1995. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications* (International ed.). McGraw-Hill, NY, 547 p.
- Ayad S.S., 1999. Computational Study of Natural Ventilation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 82: 49-68.
- Baer N.S. ve Banks P.N., 1985. Indoor air Pollution: Effects on Cultural and Historical Materials. *International Journal of Museum Management and Curatorship* 4 (9): 20-25
- Belli O., (2009). Cenia.org, 30.Haziran.2009, <http://www.cenia.org/ahlat.html>.
- Brimblecombe P., 1990. The Composition of Museum Atmospheres. *Atmospheric Environment* 24B (1): 1-8.
- Camuffo D., Van Grieken R., Busse H.J., Sturaro G., Valentino A., Bernardi A., Blades N., Shooter D., Gysels K., Deutsch F., Wieser M., Kim O. ve Ulyrch U., 2001. Enviromental Monitoring in Four European Museums. *Atmospheric Environment* 35 (1): 127-140.
- Cass G.R., Conklin M.H., Shah J.J. ve Huntzicker J.J., 1984. Elemental Carbon Concentrations – Estimation of an Historical Data-Base. *Atmospheric Environment* 18 (1): 153-162.
- CFD Online, (2006). *K-epsilon Models*. Retrieved 27 August 2009, from [http://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon\\_models](http://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models).
- Çanakkale Arkeoloji Müzesi, 2009. <http://www.gezi-yorum.net/canakkale-arkeoloji-muzesi>, <http://www.dailymotion.com/video/k6em6tHjYPP3S01bOYR>.
- Çengel Y.A. ve Cimbala J.M., 2008. *Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları*. Güven Bilimsel, İzmir, 902 p.
- Doğan H., 2006. *Uygulamalı Havalandırma ve İklimlendirme Tekniği*. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 311 p.
- Ferri J.C. ve Marin S., 2008. Creation of a Model for the Study of the Ventilation Air Diffusion of the Falun Hospital: a CFD Based Integrated Apporach. Proje Raporu. Gävle University, İsveç.
- FLUENT 6.3 User's Guide, (2006). *Fluent 6.3 User's Guide*. Fluent Inc, Lebanon, 2200 p.
- Glenn Research Center-NASA, (2008). *Navier-Stokes Equations*. (11 July 2008), from <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/nseqs.html>.



- Karaca F., Alagha O. Ve Gören S., 2009. Bir Derleme Çalışması: İç Ortam Hava Kalitesinin Müzeler ve Tarihi Bina Envanterinde Bulunan Eserlere Etkilerinin Araştırılması, Risk Değerlendirilmesi ve Uygun Kontrol Sistemlerinin Önerilmesi. *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, 599-609.
- Kontozova-Deutsch V., Krata A., Deutsch F., Bencs L. ve Grieken R.V., 2008. efficient separation of Acetate and Formate By Ion Chromatography: Application to Air Samples in a Cultural Heritage Environment. *Talanta*. 75 (2): 418-423.
- Kuas G. ve Başkaya Ş., 2002. Havalandırılan Bir Ofis Odasında Hava Hareketinin Sayısal Analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. Cilt: 17, No: 2, 35-52.
- La Gennusa M., Rizzo G., Scaccianoce G. ve Nicoletti F., 2005. Control of Indoor Environments in Heritage Buildings: Experimental Measurements in an old Italian Museum and Proposal of Methodology. *Journal of Cultural Heritag. ospheric Environment* 6 (2): 147-155.
- Larsen R., 1996. Deteriotion and Conservation of Vegetable Tanned Leather (Protection and conservation of European cultural heritage research report), European Commission Research Report No 6.
- Lee H. ve Awbi H.B., 2004. Effect of Internal Partitioning on Indoor Air Quality of Rooms with Mixing Ventilation – Basic Study. *Building and Environment*. 39 (2): 127-141.
- Li A. ve Ahmadi G., 1992. Dispersion and Deposition of Spherical Particles from Point Sources in a Turbulent Channel Flow. *Aerosol Science and Technology*. 16: 209-226.
- Ligocki M.P., Liu H., Cass G.R. ve John W., 1990a. Measurements of Particle Deposition Rates Inside Southern California Museums. *Aerosol Science and Technology* 13 (1): 85-101.
- Morsi S.A. ve Alexander A.J, 1992. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems. *Journal of Fluid Mechanics*. 55(2): 193-208.
- Nazaroff W.W. ve Cass G.R., 1989a. Mathematical Modelling of Indoors Aerosol Dynamics. *Enviromental Science and Technology* 23 (2): 157-166.

- Nazaroff W.W. ve Cass G.R., 1989b. Particle Deposition from a Natural-Convection Flow onto a Vertical Isothermal Flat-Plate-Reply. *Journal of Aerosol Science* 20 (1): 138-139.
- Nazaroff W.W., Ligocki M.P., Timothy M.A. ve Cass G.R., 1990b. Particle Deposition in Museums: Comparison of Modeling and Measurement Results. *Aerosol Science and Technology* 13 (3): 332-348.
- Nazaroff W.W., Salmon L.G. ve Cass G.R., 1990. Concentration and Fate of Airborne Particles in Museums. *Environmental Science and Technology* 24 (1): 66-77.
- Quimette J., 1981. Aerosol chemical species contributions to the extinction coefficient. PhD Dissertation (Doktora Tezi). California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.
- Schieweck A., Delius W., Siwinski N., Vogtenrath W., Genning C. ve Salthammer T., 2007. Occurrence of Organic and Inorganic Biocides in the Museum Environment. *Atmospheric Environment* 41 (15): 3266-3275.
- Schieweck A., Lohrengel B., Siwinski N., Genning C. ve Salthammer T., 2005. Organic and Inorganic Pollutants in Storage Rooms of the Lower Saxony State Museum Hanover, Germany. *Atmospheric Environment* 39 (33): 6098-6108.
- Wikipedia, the free encyclopedia (2003). *Navier-Stokes Equations*. Retrieved 2 January 2010, from [http://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes\\_equations](http://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes_equations).
- Worobiec A., Samek L., Karaszkiwicz P., Kontozova-Deutsch V., Anna Stefaniak E., Meel K.V., Krata A., Bencs L. ve Grieken R.V., 2008. A Seasonal Study of Atmospheric Conditions Influenced by the Intensive Tourist Flow in the Royal Museum of Wavel Castle in Cracow, Poland. *Microchemical Journal* 90 (2): 99-106.
- Yilmazer A., Kocar C., Ozer I.S. ve Gunduzalp C., 2008. CFPD Simulation of Radioactive Particle Deposition in Lungs. Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portoroz, Slovenia, September 8 – 11.
- Zhao B., Li X. ve Zhang Z., 2004. Numerical Study of Particle Deposition in Two Differently Ventilated Rooms. *Indoor and Built Environment* 13 (6): 443-451.

- Zhao B., Zhang Y. ve Li X.T., Yang X.D., Huang D.T., 2004. Comparison of Indoor Aerosol Particle Concentration and Deposition in Different Ventilated Rooms by Numerical Method. *Building and Environment*. 39 (1): 1-8.
- Zhang Y. ve Guan W., 2006. Design of a Natural Ventilation System in the Dunhuang Museum. Proceedings of the Sixth International Conference for Enhanced Building Operations, Shenzhen, China, November 6 – 9.

**EK 1**

**FLUENT KODUNUN GENEL ÖZELLİKLERİ**



FLUENT® 6 software is the CFD solver of choice for complex flows ranging from incompressible (low subsonic) to mildly compressible (transonic) to highly compressible (supersonic and hypersonic) flows. Providing multiple choices of solver options, combined with a convergence-enhancing multigrid method, FLUENT 6 software delivers optimum solution efficiency and accuracy for a wide range of speed regimes. The wealth of physical models in FLUENT 6 software allows you to accurately predict laminar and turbulent flows, various modes of heat transfer, chemical reactions, multiphase flows and other phenomena with complete mesh flexibility and solution-based mesh adaption.

### General Modeling Capabilities

- ◆ 2D planar, 2D axisymmetric, 2D axisymmetric with swirl, and 3D flows
- ◆ Unstructured mesh (triangle and quadrilateral elements for 2D; tetrahedral, hexahedral, polyhedral, prism, and pyramid elements for 3D)
- ◆ Steady-state or transient flows
- ◆ All speed regimes (low subsonic, transonic, supersonic, and hypersonic flows)
- ◆ Inviscid, laminar, and turbulent flows
- ◆ Newtonian or non-Newtonian flows
- ◆ Full range of turbulence models including k-epsilon, k-omega, RSM, DES, and LES
- ◆ Heat transfer including forced, natural, and mixed convection, conjugate (solid/fluid) heat transfer and radiation, including solar loading
- ◆ Chemical species mixing and reaction, including homogeneous and heterogeneous combustion models and surface deposition/reaction models
- ◆ Free surface and multiphase models, including heat transfer and reactions
- ◆ Lagrangian trajectory calculation for dispersed phase (particles/droplets/bubbles), including spray and wall film models
- ◆ Phase change model for melting/solidification applications, cavitation model, and wet steam model
- ◆ Porous media with non-isotropic permeability, inertial resistance, solid heat conduction, and option to compute interstitial velocities
- ◆ Lumped parameter models for fans, radiators, and heat exchangers
- ◆ Dynamic mesh capability for modeling flow around moving objects
- ◆ Inertial (stationary) or non-inertial (rotating or accelerating) reference frames
- ◆ Multiple reference frame (MRF) and sliding mesh options
- ◆ Mixing-plane model for modeling rotor-stator interactions
- ◆ Comprehensive suite of aeroacoustics modeling tools
- ◆ Volumetric sources of mass, momentum, heat, and chemical species
- ◆ Material property database
- ◆ Dynamic (two-way) coupling with GT-Power and WAVE
- ◆ Add-on modules for fuel cells, magnetohydrodynamics, population balance, and continuous fiber modeling
- ◆ Extensive customization capability via user-defined functions



## Mesh Capabilities

- ◆ Quadrilateral, triangular, hexahedral (brick), tetrahedral, polyhedral, prism (wedge), pyramid, and mixed element meshes
- ◆ Non-conformal (non-matching) mesh interfaces, including fluid/solid interfaces
- ◆ Mesh adaption (refinement and coarsening) based on solution variables, derived quantities (e.g.  $y^+$ , wall proximity), and in user-specified regions, including:
  - ◆ Conformal adaption on triangular and tetrahedral meshes
  - ◆ Hanging node adaption for all element types
  - ◆ Automatic interpolation of solution after mesh refinement
  - ◆ Dynamic hanging node adaption at user-specified intervals
  - ◆ Geometry-based adaption
- ◆ Mesh smoothing and improvement tools
- ◆ Mesh manipulation tools
  - ◆ Scaling, translation, rotation, merging, fusion, and separation
  - ◆ Deletion, deactivation/reactivation, replacement and appending of cell zones
- ◆ Hybrid mesh generation utilities
- ◆ Grid-to-grid solution interpolation capability

## Numerical Method

- ◆ Three solver options: pressure-based implicit, density-based implicit and density-based explicit; all the solvers feature:
  - ◆ Finite-volume method based on fully unstructured meshes
  - ◆ Adaptive time stepping option for implicit schemes
  - ◆ Dynamic memory allocation
  - ◆ Single and double precision executables
- ◆ Pressure-based solver
  - ◆ Pressure-based segregated solution algorithms including SIMPLE, SIMPLEC, and PISO
  - ◆ Pressure-based coupled solution algorithm
  - ◆ Multiple choices for discretization schemes for convection terms including first-order upwind, power-law, second-order upwind, QUICK, MUSCL, central differencing (for LES), and bounded central differencing (for LES)
  - ◆ First-order and second-order implicit time discretization schemes
  - ◆ Multiple choices for pressure interpolation schemes including standard, PRESTO, linear, second-order, and body-force weighted interpolations
  - ◆ Implicit treatment of body forces
  - ◆ Algebraic multigrid (AMG) linear equation solver with V, W, F, and flex cycles, and Gauss-Seidel relaxation method
  - ◆ Non-iterative transient solution options
- ◆ Density-based solvers
  - ◆ Preconditioning for incompressible and mixed regime flows
  - ◆ Coupled solution for all mean flow qualities
  - ◆ Decoupled (segregated) solution of turbulence, radiation, and user-defined scalar transport equations
  - ◆ Multiple choices for discretization schemes including first-order upwind, second-order upwind, MUSCL, and low diffusion flux second order scheme (for LES)
  - ◆ First-order and second-order implicit time discretization schemes
  - ◆ Explicit solver
    - ◆ Multi-stage (Runge-Kutta) time-stepping algorithm
    - ◆ Full approximation scheme (FAS) Multigrid, local time stepping and implicit residual smoothing convergence acceleration
    - ◆ Explicit global time-stepping option for time-accurate solutions

- ◆ Implicit solver
  - ◆ Full Newton-type linearization of all fluxes and source terms
  - ◆ Algebraic multigrid (AMG) block matrix linear equation solver with V and F cycles; Gauss-Seidel relaxation method

## Turbulence Modeling

- ◆ Multiple choices for k-epsilon models including standard, realizable, and RNG models
  - ◆ Submodels in k-epsilon models for buoyancy and compressibility effects
  - ◆ RNG submodels for swirl, low Reynolds number effects (differential viscosity), and analytical formula for turbulent Prandtl/Schmidt numbers for k, epsilon, energy, and species
- ◆ K-omega turbulence models, with shear correction and transitional flow options
- ◆ Full Reynolds stress model (RSM) including wall-reflection model and linear or quadratic pressure-strain model
- ◆ Spalart-Allmaras one-equation (eddy-viscosity transport) model
- ◆ Detached eddy simulation (DES)
- ◆ Large eddy simulation (LES)
  - ◆ Subgrid scale stress models (Smagorinsky-Lilly and WALE)
  - ◆ Dynamic subgrid scale stress models (dynamic Smagorinsky-Lilly and dynamic kinetic energy transport)
  - ◆ Werner-Wengle wall functions
- ◆ V2F turbulence model (additional purchase required)
- ◆ Near-wall modeling options, including:
  - ◆ Standard wall functions
  - ◆ Non-equilibrium wall functions sensitized to pressure gradient
  - ◆ Enhanced wall treatment model
- ◆ Low Reynolds number k-epsilon models
- ◆ Artificial triggering of turbulence using user-specified laminar zones for transitional flow modeling (fixed transition)
- ◆ Customizability of model constants, turbulent and subgrid scale viscosities, and source terms in turbulence transport equations

## Heat Transfer

- ◆ Laminar/turbulent forced convection including viscous heating
- ◆ Natural and mixed convection with optional Boussinesq approximation
- ◆ Conjugate (fluid/solid) heat transfer with isotropic/anisotropic conductivity in solids, including shell-element conduction and thermal convection in moving solids
- ◆ Coupling with radiation, dispersed phase, and species transport

## Radiation Heat Transfer Modeling

- ◆ Discrete ordinates model for participating radiation including scattering, refraction, specular surfaces, non-gray effects and energy coupling for media with high optical thickness
- ◆ Surface-to-surface radiation model for non-participating media
- ◆ Discrete transfer radiation model (DTRM) with participating media
  - ◆ Radiation mesh coarsening option
- ◆ P-1 radiation model with participating/scattering media options
- ◆ Rosseland model
- ◆ Solar load model
- ◆ Gas absorption coefficient dependence on water vapor, carbon dioxide, and particle concentration using WSGG (weighted sum of gray gases) model
- ◆ Radiation heat transfer to particles/droplets (P-1, discrete ordinates model)

## Chemical Species Transports, Reaction, and Combustion Modeling

- ◆ Formulation based on multiple species transport equations, including convection, diffusion, and reaction source terms with multicomponent diffusion and thermal (Soret) diffusion modeling
- ◆ Generalized finite rate chemistry for N reactions (forward/backward) with:
  - ◆ Arrhenius model
  - ◆ Combined Arrhenius/eddy-breakup model
  - ◆ Eddy dissipation concept (EDC) model
  - ◆ Laminar stiff chemistry solver
- ◆ Composition PDF transport combustion model
- ◆ In-situ adaptive tabulation (ISAT)
- ◆ Conserved scalar PDF (one or two mixture fractions) based formulation for diffusion-controlled (non-premixed) reactions using:
  - ◆ Chemical equilibrium
  - ◆ Laminar flamelet model
  - ◆ Unsteady-laminar flamelet model
- ◆ Turbulent premixed combustion model based on turbulent flame speed closure model
- ◆ Partially premixed turbulent combustion model
- ◆ Subgrid scale combustion models for large eddy simulations (LES)
- ◆ Combustion submodels for coal, liquid, gas and mixed fuel types
- ◆ Pollutant models
  - ◆ NO<sub>x</sub> (including submodels for SNCR)
  - ◆ Soot
  - ◆ SO<sub>x</sub>
- ◆ Autoignition and spark ignition models
- ◆ Multi-step surface reactions with multiple sites and site species
  - ◆ Surface site balance and desorption of gas species from surface
  - ◆ Surface reactions in porous media
- ◆ Built-in database for equilibrium data, thermodynamic properties, standard reaction mechanisms, and mixture composition in gaseous, coal, and liquid fuel systems
- ◆ User-defined access to reaction rates and source/sink terms
- ◆ Import of reaction mechanisms in Chemkin format

## Lagrangian Dispersed Phase Modeling

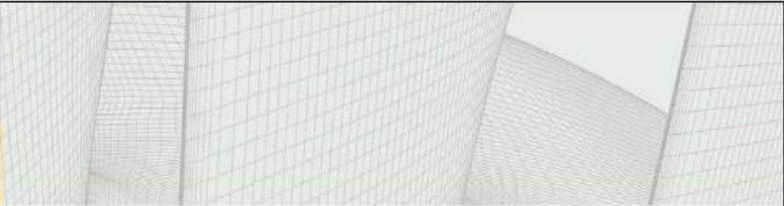
- ◆ Trajectory calculation for particles/droplets/bubbles in steady and unsteady flows
  - ◆ Error-controlled adaption of the integration time-step
  - ◆ Automated tracking scheme selection
- ◆ Momentum, heat, and mass transfer coupling with fluid (continuous) phase
  - ◆ Two-way turbulence coupling option
- ◆ Particle force balance includes added mass and pressure gradient forces with options for thermophoretic, Saffman lift, and Brownian forces
- ◆ Multiple choice of built-in drag laws for spherical and non-spherical particles and high Mach number effects
- ◆ Liquid spray models
  - ◆ Suite of primary atomization models
  - ◆ Spray break-up models
  - ◆ Droplet collision and coalescence models
  - ◆ Distortion drag model
- ◆ Wall film model
- ◆ Multiple choice of injection types (single, group, cone, surface, user-specified file)
  - ◆ Particle size distribution through linear distribution or Rosin-Rammler equation
- ◆ Multiple choice of boundary conditions for particles, including spray-wall interaction model, reflection with constant or impact angle-dependent coefficient of restitution, trap and escape



- ◆ Wall erosion model
- ◆ Turbulent dispersion via discrete random-walk model
- ◆ Optional particle-cloud model based on a Gaussian PDF of particle position
- ◆ Heat transfer between fluid and dispersed phase, including convection and radiation effects
- ◆ Mass transfer between liquid droplets or devolatilizing particles and the gas phase, including multicomponent particles and droplets
- ◆ Evaporation and boiling of liquid droplets
- ◆ Drying of wet particles
- ◆ Coal combustion submodels for devolatilization, swelling, and char burnout
- ◆ Heterogeneous surface reactions between solid particles and fluid phase (kinetic and/or diffusion limited rates)
- ◆ Residence time reporting, detailed trajectory reporting, particle erosion/accretion monitoring, coal particle diagnostics, heat and mass transfer summaries, and particle dispersion display
- ◆ Particle/droplet database with properties of standard solid particles and liquid droplets, including common liquid fuels and coals
- ◆ Parallelization for shared and distributed memory systems

### Multiphase Flow Modeling

- ◆ Volume-of-fluid (VOF) multiphase model
  - ◆ Gas-liquid or liquid-liquid system modeling for N immiscible fluids
  - ◆ Interface tracking, including surface tension and wall adhesion effects
  - ◆ High resolution interface capture (HRIC) scheme option
  - ◆ Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes (CICSAM) scheme option
  - ◆ Heat transfer and mass transfer modeling
  - ◆ Species transport and chemical reactions within or between phases
  - ◆ Gas and liquid phase compressibility
  - ◆ Variable time-stepping
  - ◆ Includes custom wall contact angle via user-defined functions
- ◆ Eulerian multiphase model
  - ◆ Gas-liquid, gas-solid, liquid-solid, liquid-liquid, and gas-liquid-solid systems for N fluids
  - ◆ Heat transfer and mass transfer modeling
  - ◆ Species transport and chemical reactions within or between phases
  - ◆ Gas and liquid phase compressibility
  - ◆ Coupled momentum solver
  - ◆ Includes virtual mass force, multiple choices for drag and lift laws, and custom laws via user-defined functions
  - ◆ Multiple closure schemes for k-epsilon and RSM turbulence models
  - ◆ Source terms for individual volume fraction equations; customizable via user-defined functions
- ◆ Mixture multiphase model
  - ◆ N-phases
  - ◆ Heat transfer modeling
  - ◆ Species transport and chemical reactions within or between phases
  - ◆ Customizable slip velocity and particle diameter
  - ◆ Source terms for individual volume fraction equations; customizable via user-defined functions
- ◆ Granular phase model with multiple (N) solid particle phases
  - ◆ Available with Eulerian and mixture multiphase models
  - ◆ Multiple choices for constitutive relationships and properties of granular phase, including custom relations via user-defined functions
  - ◆ Johnson and Jackson boundary condition
- ◆ Cavitation model with ability to handle highly cavitating flows
- ◆ Wet steam model



### Dynamic Mesh Modeling

- ◆ Mesh motion and deformation automatically handled by solver
  - ◆ Cell deformation using spring analogy
  - ◆ Dynamic cell layering
  - ◆ Local remeshing
  - ◆ 2.5D remeshing
- ◆ Automatic refinement/coarsening capability using sizing functions
- ◆ Compatible with all other physical models including multiphase and reacting flows
- ◆ In-cylinder mesh motion options and crevice/blowby model
- ◆ Mesh motion preview
- ◆ Six-degrees-of freedom (6DOF) solver

### Acoustics Modeling

- ◆ Ffowcs-Williams & Hawkings (FW-H) acoustics analogy
  - ◆ Multiple receiver and source selection
  - ◆ Support for rotating surfaces
- ◆ Broadband noise source models for estimating acoustic sources from steady-state simulations
  - ◆ Semi-empirical correlations for acoustic source power
  - ◆ Source term estimation for Lilly and Linearized Euler equations based on synthesized turbulent velocity field
- ◆ Specialized post-processing, including discrete Fourier transform (FFT)
- ◆ Export of acoustic source data to LMS-SYSNOISE

### Boundary Conditions

- ◆ Multiple flow inlets/exits, with specification of:
  - ◆ Velocity or mass flux inlet (in terms of Cartesian or cylindrical-polar components, magnitude and direction, magnitude of normal component, or user-specified local coordinates)
  - ◆ Inlet static and total pressure, with normal or specified flow angle
  - ◆ Inlet mass fraction for multicomponent flows
  - ◆ Inlet fluid static and total temperature
  - ◆ Inlet turbulent kinetic energy and dissipation rate (with optional input of turbulence intensity and length scale, hydraulic diameter, or viscosity ratio)
  - ◆ Exit static pressure including an option to specify target mass flow rate
  - ◆ Outflow with specified flow rate weighting
- ◆ Non-reflecting boundary conditions
- ◆ Intake/exhaust fans
- ◆ Intake/outlet vents
- ◆ Wall boundaries, with specification of:
  - ◆ Tangential wall velocity using Cartesian component form or rotational speed
  - ◆ Shear rates, including slip conditions
  - ◆ Thermal boundary conditions using heat-flux, temperature, or external convection, radiation (emissivity), or mixed conditions
  - ◆ Shear-stress calculation using choice of wall functions in turbulent flow, including wall roughness effects
- ◆ Multiphase velocity or mass flux boundary conditions for individual phases
- ◆ Two-sided walls with optional coupling and specified resistance for conduction heat transfer
- ◆ Spatial and temporal profiles for inlet and wall boundary conditions
- ◆ Profile functions for fan curves
- ◆ Sub-grid size inlet specification through volume sources
- ◆ Symmetry and axis boundary conditions
- ◆ Translationally and rotationally periodic boundaries (conformal and non-conformal)
- ◆ Specified mass flow rate streamwise-periodic boundary conditions (flow and heat transfer)

- ◆ Specified pressure drop periodic boundary conditions
- ◆ Ability to copy or reuse boundary conditions
- ◆ Fixed variable option for computational cells

### Material Properties

- ◆ Constant or variable fluid properties including temperature and composition dependence (data pair or piecewise polynomial input)
- ◆ Comprehensive database containing material properties for standard fluids and solids (user-modifiable), including:
  - ◆ Standard reaction mechanisms, chemical species mixtures, thermodynamic, and kinetic properties
  - ◆ Particle/droplet data for standard solids, liquids, liquid fuels, and coals
- ◆ Custom database creation for storing material properties and reaction mechanisms
- ◆ Fluid density calculation using ideal gas law or polynomial dependence on temperature; optimal Boussinesq treatment of density for buoyant flows
- ◆ Fluid viscosity calculation using polynomial or power law function of temperature or Sutherland's law
- ◆ Non-Newtonian fluid models
  - ◆ Power law
  - ◆ Herschel-Bulkley
  - ◆ Carreau
  - ◆ Cross
  - ◆ User-defined law, with temperature-dependent fluid model parameters
- ◆ Temperature-dependent heat capacity and thermal conductivity in solid regions
- ◆ Non-isotropic thermal conductivity
- ◆ Standard real gas model for refrigerants and hydrocarbons
- ◆ User-defined real gas model for simple and complex equations of state
- ◆ Ability to model multiple species with either real gas model
- ◆ User-defined property inputs

### User-Defined Functions

- ◆ Interpreted (compiled at runtime) or compiled (compiled in advance and linked at runtime)
- ◆ Access to memory for user-defined functions
- ◆ Specification of volumetric sources in continuity, momentum, energy, turbulence, species, mixture fraction, and volume fraction transport equations
- ◆ Surface and volume reaction rates
- ◆ Customized NO<sub>x</sub> reaction rates
- ◆ Definition of custom physical properties
- ◆ User-defined density for compressible liquid modeling
- ◆ Customized boundary/initial conditions
- ◆ User-defined scalar transport equations for fluid and/or solid zones
- ◆ Ability to model anisotropic diffusivity with user-defined scalar transport equations
- ◆ Creation of custom postprocessing variables
- ◆ User-specified scattering phase functions for radiation modeling
- ◆ Body force, drag, boundary condition, and source term for discrete phase modeling

### Parallel Processing

- ◆ Parallel processing on shared and distributed memory systems
- ◆ Domain decomposition method, with grid partitioning tools (e.g. METIS)
- ◆ Dynamic load balancing
- ◆ Utility for launching serial and distributed parallel jobs from Windows desktops
- ◆ Utilities for load management via LSF and SGE third party software
- ◆ Utilization of vendor-optimized message passing libraries



### Interface, Graphics, Postprocessing, and Reporting

- ◆ Client-server architecture for co-processing and remote execution
- ◆ Fully interactive graphical and text-based user interfaces
- ◆ Journaling and scripting
- ◆ Diagnostics and error trapping
- ◆ Grid checking (validity, quality, size) and reordering utilities
- ◆ Case check diagnostic tool
- ◆ Dynamic control of setup, solution, and postprocessing tasks
- ◆ Summary reports of solver and physical model settings
- ◆ Flexible units specification (SI units, British units, custom/mixed units)
- ◆ Dynamic interrupt and restart of calculations
- ◆ Option to automatically save case/data files
- ◆ Residual reporting and display
- ◆ Reporting and monitoring of minimum and maximum values
- ◆ Reporting and monitoring of fluxes of mass, heat, and chemical species
- ◆ Reporting and monitoring of forces and moments
- ◆ Computation, reporting, and monitoring of volume integrals and averages
- ◆ Computation, reporting, and monitoring of surface integrals, averages, standard deviations, and flowrates
- ◆ Turbomachinery application-specific postprocessing
  - ◆ Ability to create surfaces and display contours in meridional, pitchwise, and spanwise coordinates
  - ◆ 2D contour plots and XY plots of pitchwise averages
  - ◆ Ability to apply different periodic repeat angles to different cell zones
- ◆ Time-average and RMS statistics
- ◆ Calculator utility for user-defined (custom) field functions
- ◆ Calculation of gradients (vector and scalar) and derived quantities
- ◆ Histograms of geometric and solution data
- ◆ Vector plots for velocity field and user-defined vector fields
- ◆ Contour plots on boundary surfaces and user-specified surfaces
- ◆ Pathlines
- ◆ XY-plots
- ◆ Phase-specific postprocessing for multiphase flows
- ◆ Discrete Fourier transform (FFT) for general time series data
- ◆ Graphical probing of data
- ◆ Interactive sweeping of planes through the solution domain
- ◆ Automated animation creation tools
- ◆ On-screen mouse-based view manipulation (rotation, translation, magnification)
- ◆ Extensive hardcopy options
- ◆ VRML export

### Export/Import

- ◆ Export of solution data to:
  - ◆ ANSYS®, ABAQUS®, CGNS, I-DEAS, NASTRAN™, PATRAN™ and RadTherm®
  - ◆ AVS, Data Explorer™, EnSight, FAST, Fieldview and Tecplot®
- ◆ Data export in ASCII format (CSV and space delimited)
- ◆ Data import from the CGNS format
- ◆ Mesh import from the ANSYS, CGNS, FIDAP®, I-DEAS, NASTRAN, and PATRAN formats



FLUENT 6.3

## On-Line Help and Documentation

- ◆ Complete HTML-based on-line documentation
- ◆ User's guide, including underlying theories and applications
- ◆ Tutorial guide, with model-specific examples
- ◆ User-defined functions manual
- ◆ Text user interface manual
- ◆ Validation manual
- ◆ Fluent User Services Center

## Supported Hardware

- ◆ Serial and parallel versions of FLUENT 6.3 are supported on Windows, LINUX and UNIX platforms. Please contact Fluent Inc. for details.

## Add-On Modules (additional purchase required)

- ◆ Continuous fiber module
- ◆ Fuel cell module
  - ◆ Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)
  - ◆ Solid-oxide fuel cells (SOFC)
- ◆ Magnetohydrodynamics (MHD) module
- ◆ Population balance module



FLUENT®

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 4.1. Dört farklı pencere durumu için hız değerleri.....	27
Çizelge 4.2. Sırasıyla dört farklı havalandırma durumu için lahit odasında parçacıkların dağılımı.....	37

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

- Şekil 4.1. Altı örnekli oda içi akış modeli için konfigürasyon: (1) Çapraz (cross) havalandırma, (2) daha büyük çıkışlı çapraz havalandırma, (3) iki çıkışlı çapraz havalandırma, (4) komşu duvar çıkışlı havalandırma, (5) komşu yüzeylerde en uç nokta giriş-çıkışlı normal havalandırma, (6) 30<sup>0</sup> giriş rüzgarı ile komşu yüzeylerde en uç nokta giriş-çıkışlı havalandırma.....18
- Şekil 4.2. Odanın yarı bölgesinin ağ yapılandırması.....18
- Şekil 4.3. Eşit giriş-çıkışlı çapraz havalandırma (birinci durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.....19
- Şekil 4.4. Daha büyük çıkışlı çapraz havalandırma (ikinci durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.....19
- Şekil 4.5. İki çıkışlı çapraz havalandırma (üçüncü durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.....20
- Şekil 4.6. Bitişik duvar çıkışlı havalandırma (dördüncü durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.....21
- Şekil 4.7. Normal rüzgarlı komşu yüzeylerde en uzak giriş-çıkışlı havalandırma (beşinci durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf çalışmada FLUENT sonuçları.....21
- Şekil 4.8. 30<sup>0</sup> lik giriş ile bitişik en uzak uç giriş-çıkışlı havalandırma (altıncı durum) için hız vektörleri (üst) ve akış fonksiyonları (alt). Sol taraf literatür, sağ taraf FLUENT sonuçları.....22
- Şekil 4.9. Çanakkale Arkeoloji Müzesi ve lahitlerin bulunduğu oda.....23

Şekil 4.10. Odada sergilenen lahitler. Polyksena lahiti (üst) ve Altıkulaç lahiti (alt).....	24
Şekil 4.11. Lahit odası planı.....	25
Şekil 4.12. Gambit ile lahit odası modeli.....	25
Şekil 4.13. Müzenin ağ yapılandırılması.....	26
Şekil 4.14. Birinci durum için lahitler çevresindeki hız vektörlerinin büyüklükleri.....	28
Şekil 4.15. Birinci durum için parçacıkların hızına bağlı parçacığın izlediği yol. Açılı görünüm. (m/s).....	28
Şekil 4.16. Birinci durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol. Açılı görünüm.....	29
Şekil 4.17. İkinci durum için lahitler çevresindeki hız vektörlerinin büyüklükleri (m/s).....	29
Şekil 4.18. İkinci durum için parçacıkların hızına bağlı parçacığın izlediği yol. Üstten görünüm. (m/s).....	30
Şekil 4.19. İkinci durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol. Yandan görünüm (üst) ve üstten görünüm (alt).....	30
Şekil 4.20. İkinci durum için parçacıkların kalma sürelerine bağlı parçacığın izlediği yol. Üstten görünüm. (s).Şekil 4.21. Üçüncü durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol.....	31
Şekil 4.21. Üçüncü durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol. Yandan görünüm (üst), açılı görünüm (orta) ve üstten görünüm (alt).....	32
Şekil 4.22. Üçüncü durum için parçacıkların hızına bağlı parçacığın izlediği yol (m/s). Yandan görünüm (üst), üstten görünüm (orta) ve açılı görünüm (alt).....	33
Şekil 4.23. Üçüncü durum için akışkanın hız vektörlerinin büyüklükleri (m/s). Açılı görünüm (üst), üstten görünüm (alt).....	34



Şekil 4.24. Dördüncü durum için akışkanın hız vektörlerinin büyüklükleri (m/s). Üstten görünüm.....	35
Şekil 4.25. Dördüncü durum için parçacığın yarıçapına bağlı parçacığın izlediği yol. Üstten görünüm (üst), açılı görünüm (alt).....	35
Şekil 4.26. Dördüncü durum için parçacıkların hızına bağlı parçacığın izlediği yol. Açılı görünüm. (m/s).....	36
Şekil 4.27. Dördüncü durum için parçacıkların kalma sürelerine bağlı parçacığın izlediği yol. Açılı görünüm. (m/s).....	36
Şekil 4.28. Dört farklı havalandırma durumu için lahitlerin çevresindeki parçacık birikim oranları.....	38

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sercan GÜLOĞLU

Doğum Yeri : Muğla

Doğum Tarihi : 03.01.1983

### EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi  
Fizik Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

### İLETİŞİM

E-posta Adresi: mydonez83@hotmail.com