

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAPALI OTOPARKLARDA TAŞIT YANGINININ SAYISAL BENZETİMİNE
YÖNELİK K-EPSİLON, LES VE DES ÇALKANTI MODELLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Barış ELBÜKEN

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Disiplinler Arası Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAPALI OTO PARKLARDA TAŞIT YANGINININ SAYISAL BENZETİMİNE
YÖNELİK K-EPSİLON, LES VE DES ÇALKANTI MODELLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Barış ELBÜKEN

(511081127)

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Disiplinler Arası Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İ. Bedii ÖZDEMİR

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511081127 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Barış ELBÜKEN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“KAPALI OTO PARKLARDA TAŞIT YANGINININ SAYISAL BENZETİMİNE YÖNELİK K-EPSİLON, LES VE DES ÇALKANTI MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İ. Bedii ÖZDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. A. Rüstem ASLAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. H. Ertuğrul ARSLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yalnızca Selma'ya,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi kapsamında yapılan çalışma benim için uzun ve zorlu bir yaşam mücadelesi sürecinin sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Çalışma kapsamında yaptığım benzetimler ve sonuçları, öncülü olan kuramsal altyapı için literatür taraması ve kaleme dökülmesi yedek subay olarak yapmakta olduğum askerlik hizmetim esnasında kalmakta olduğum Sıhhiye Orduevi'nin salonlarında, kalmış olduğum farklı odalarda ve nöbetlerimde birliğim olan kışlada yaptığım aralıksız çalışmalara dayanmaktadır.

Satırlara sığdırmak mümkün değil ancak özellikle belirtmeliyim ki en başından beri bana ve kendisinden çaldığım zamana sabreden ve varlığıma rağmen yalnız kalan sevgili eşim olmasaydı bu çalışma ortaya çıkamazdı. Ayrıca hesaplamalı mühendislik konusundaki çalışma kültürümün temellerini atan, her zaman maddi ve manevi destek veren, bana bilgisi ve fikirleriyle ışık tutan çok saygıdeğer hocam Prof. Dr. İ. Bedii ÖZDEMİR'e başta olmak üzere çalışmalarımı sürdürürken tezimi bitireceğime olan inancı ve bana sağladığı manevi destekten ötürü ve bu tez kapsamındaki sayısal benzetimleri gerçekleştirebilmem için yüksek performanslı bilgisayarlarını uzaktan bağlantıyla kullanımına cömertçe sunan değerli arkadaşım Uzay Müh. Murat SÜER'e ve GUMUSH Aerospace firması'na saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Nisan 2013

Barış ELBÜKEN
(Fizikçi, Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Yangın Modellemesinde HAD'nin Kullanımı	1
1.2 Karşılaştırmada Kullanılan Çalkantı Modelleri	2
1.2.1 Karşılaştırılan çalkantı modellerinin ön araştırmaya dayalı zayıflık ve üstünlükleri.....	3
2. ÇALKANTI DENKLEMLERİ	5
2.1 Çalkantı Olgusu ve Modelleme	5
2.2 Yangında Karakteristik Uzunluk ve Çalkantılı Akışa Geçiş	6
2.3 Eksenel Bakışlı Yangın Kaynağının Özellikleri	7
2.4 Sayısal Çözüm Yönelik Çalkantılı Akış Denklemleri	9
2.5 k-Epsilon (k- ϵ) Çalkantı Modeli.....	11
2.6 LES Çalkantı Modeli	12
2.7 DES Çalkantı Modeli	14
3. İŞİNİM MODELİ	15
3.1 İşinim Yayılım Denklemi ve Karacisim İşiniminin Kullanımı	15
3.2 Karacisim İşinimi	16
3.3 P1 İşinim Modeli	16
3.3.1 Duvar yakını davranışı	17
3.4 Gri Gaz Varsayımı.....	17
4. SAYISAL BENZETİM STRATEJİSİ	19
4.1 Akış Probleminin Çözümü İçin Kullanılan HAD Yazılımı ve Çözüm Stratejisi.....	19
4.1.1 Taşınım ve yayılım.....	19
4.1.2 Yüksek mertebeli fark şeması	20
4.1.3 Basınç-hız ilişkisi ve SIMPLE algoritması	21
4.1.4 Zamana bağlı terimler ve ikinci mertebe geri yönlü Euler şeması.....	22
4.1.5 Akuple denklem sistemleri.....	23
4.1.6 Çözülen denklemlerin sonlu hacimler yöntemi ile ayrıştırılması....	24
4.1.7 Sayısal çözüm algoritması	27
4.1.8 MG-ILU ile doğrusallaştırılmış denklemlerin çözümü.....	28
4.2 HAD Benzetimlerinde Kullanılan Etken Parametreler ve İş Bilgisayarı Özellikleri.....	31

5. YANGIN BENZETİMİ VE SONUÇ KARŞILAŞTIRMASI.....	33
5.1 Model Geometrisi ve Ayrıklaştırılmış Sayısal Hesaplama Ağı.....	33
5.1.1 Sayısal ağ ile karakteristik uzunluk karşılaştırması	37
5.2 Yangın Kurtarma Sistemine Yönelik HVAC Tasarım Kriterleri ve Duman Kontrol Zonları.....	38
5.3 Benzetimlerde Kullanılan Ortak Sınır Koşulları ve Hacimsel Kaynaklar...	42
5.3.1 Benzetimlerde yangının tanımlanması	42
5.3.1.1 Yangın kaynağının konvektif ısı gücü	42
5.3.1.2 Duman üreme debisi.....	46
5.3.1.3 Yangın kaynağının yüzey sıcaklığı (ışınım ısı akısı).....	48
5.3.2 Egzoz ve taze hava şaftlarında tanımlanan debiler ve açıklıklar	49
5.3.3 Duvar davranışı	51
5.3.4 Jetfanlar	52
5.4 Benzetim Sonuçları ve Çalkantı Modellerinin Karşılaştırılması	54
5.4.1 CO ₂ kütle oranlarının karşılaştırılması	54
5.4.1.1 Tavan jeti düzlemi (2,5 m yükseklik).....	54
5.4.1.2 Bel düzlemi (1 m yükseklik)	56
5.4.1.3 Görüntüleme noktalarında CO ₂ kütle oranlarının zaman davranışı	57
5.4.2 Sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması.....	60
5.4.2.1 Tavan jeti düzlemi (2,5 m yükseklik).....	60
5.4.2.2 Ölçüm noktalarında sıcaklığın zaman davranışı	61
5.4.3 Yangın noktalarında akışkan davranışının karşılaştırılması.....	63
5.4.3.1 Hız alanlarının karşılaştırılması	64
5.4.3.2 Sıcaklıkların karşılaştırılması	66
5.5 Sonuç Yorumları.....	68
KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	77

KISALTMALAR

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
DoS	: Benzetimin Tasarımı (Design Of Simulation)
DES	: Bağımsız Eddy Benzetimi (Detached Eddy Simulation)
LES	: Büyük Eddy Benzetimi (Large Eddy Simulation)
UM	: Yapılandırılmamış Hesaplama Uzayı/Ağı (Unstructured Mesh)
RANS	: Reynolds Ortalama Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes)
URANS	: Zamana Bağlı Reynolds Ortalama Navier-Stokes (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes)
SGS	: Sayısal Ağ Ölçeği Altı (Sub-Grid Scale)
FV	: Sonlu Hacimler (Finite Volumes)
SIMPLE	: Basınca Bağlı Denklemler için Yarı-İmplicit Yöntem (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)
MG	: Çoğaltılmış sayısal ağ (Multigrid)
AMG	: Cebirsel Multigrid (Algebraic Multigrid)
ILU	: Tamamlanmamış Alt Üst Ayrıklaştırması (Incomplete Lower Upper)
HVAC	: Isıtma, Havalandırma ve Hava Şartlandırma (Heating, Ventilation and Air Conditioning)
CEL	: CFX İfade Dili (CFX Expression Language)
CFL	: Courant-Friedrich-Lewy
PIV	: Parçacık Görüntülemesine Dayalı Hız Ölçümü (Particle Image Velocimetry)
FSI	: Akışkan-Katı Etkileşimi (Fluid-Structure Interaction)
US-NIOSH	: Amerikan Ulusal İş Güvenliği ve Sağlık Enstitüsü
ppm	: Milyonda partikül (Parts per million)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1: Benzetimlerde kullanılan etken parametre ve özellikler.	31
Çizelge 5.1: Sayısal ağa ait bilgiler.	37
Çizelge 5.2: Otopark projesinde belirtilen egzoz ve taze hava şaft debileri.....	40
Çizelge 5.3: Her zonda toplam jetfan debisinin uygunluk kontrolü.....	41
Çizelge 5.4: Bir basamaklı metan yanmasında rol alan kimyasal türler.....	46

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Yangın kaynağında deflagrasyon ve duman üremesi.....	2
Şekil 2.1: Çalkantılı kinetik enerjinin yıkımı.	5
Şekil 2.2: Karışma uzunluğunu tamamlamayan iki akışkanın arayüzünde çalkantı. ..	6
Şekil 2.3: Eksenel bakışlı yangın kaynağının yapısı.	7
Şekil 2.4: Yangın kaynağı ve jeti içinde farklı yüksekliklerde ölçülen ve beklenen hızlar.	8
Şekil 2.5: Anlık ölçülen ve beklenen hız alanının karşılaştırılması.	9
Şekil 4.1: Birinci mertebeden ileri yönlü fark şemasında bilginin yayılımı.....	20
Şekil 4.2: Merkezi fark şemasında bilginin interpolasyonu.	20
Şekil 4.3: Tanımlanmış karıştırma faktörü kullanımında bilginin yayılımsal yapısı.	21
Şekil 4.4: İki boyutta sayısal ağ elemanı yapısı.....	25
Şekil 4.5: İntegrasyon noktaları ve bir sayısal ağ elemanı.	26
Şekil 4.6: CFX benzetim yazılımının akış alanını hesaplamada kullandığı çözüm algoritması.	28
Şekil 4.7: İnce ağdan kaba ağa bir boyutta görüntüleme ile birinci mertebeden aktarım.	30
Şekil 4.8: İnce ağdan kaba ağa bir boyutta görüntüleme ile ikinci mertebeden aktarım.	30
Şekil 5.1: Model geometrisinin kullanıldığı projenin üçüncü bodrum katı.....	33
Şekil 5.2: Model geometrisi.....	34
Şekil 5.3: Yangın duman egzozu yada taze hava sağlaması için kullanılan şaft örnekleri.....	34
Şekil 5.4: Model geometrisinin üst görünüşte metre cinsinden boyutları ve kat alanı.	35
Şekil 5.5: Model geometrisinin yan görünüşte metre cinsinden boyutları ve kat yüksekliği detayı.....	35
Şekil 5.6: Hesaplama uzayının sayısal ağ ile ayrıklaştırılmış halinin dolu görünümü.....	35
Şekil 5.7: Sayısal ağ eleman sayısının “eleman kalitesi” parametresine bağlı grafiği.	36
Şekil 5.8: Sayısal ağ eleman sayısının düzgün çokyüzlüden sapma grafiği.....	36
Şekil 5.9: Sayısal ağ eleman sayısının “eleman açıklık oranı” parametresine bağlı grafiği.	37
Şekil 5.10: Yangın için karakteristik uzunluk ile sayısal ağ eleman sıklığının yangın noktasında karşılaştırılması.	38
Şekil 5.11: Kapalı otoparkta duman kontrol zonları, jetfanlar, taze hava ve duman egzoz şaftları.....	40
Şekil 5.12: Otomobillere ilişkin yangın eğrisi.	43
Şekil 5.13: İki yangın konumundaki ısı salım güçleri.	43
Şekil 5.14: Yangın başlangıç evresinde ısı salımının zamana bağlı davranışı.	44
Şekil 5.15: Tasarım yangını gücünün zamana bağlı davranışı.	45
Şekil 5.16: Ortama yangın kaynaklarından giren duman debisi.....	47

Şekil 5.17: Tasarım yangını duman debisinin zamana bağlı davranışı.....	47
Şekil 5.18: Motor bölümünde yangın çıkmış bir otomobil.....	48
Şekil 5.19: Motor bölümünde yangın çıkan bir araç için ulaşılan sıcaklıklar.	48
Şekil 5.20: Tasarım yangını yüzey sıcaklığının zamana bağlı davranışı.	49
Şekil 5.21: Fanlarda çalışma noktasının belirlenmesi.	50
Şekil 5.22: Egzoz yada taze hava şaftlarında kullanılan endüstriyel tip eksenel fan.	50
Şekil 5.23: Rampa çıkışlarında kullanılan açıklık sınır koşulları.	51
Şekil 5.24: Jetfanların otoparktaki kullanımı.	52
Şekil 5.25: Jetfan debisinin momentum kaynağına dönüştürülmesiyle kullanımı. ...	53
Şekil 5.26: Jetfan üflemesinin benzetim görüntüsü.	53
Şekil 5.27: Tavan jeti düzleminde (2,5 m) CO ₂ kütle oranlarının zamana bağlı karşılaştırması.	54
Şekil 5.28: Bel seviyesi düzleminde (1 m) CO ₂ kütle oranlarının zamana bağlı karşılaştırması.	56
Şekil 5.29: Çözüm uzayından örnekleme yapılan görüntüleme noktaları.	57
Şekil 5.30: Çözüm uzayı için sonuç görüntüleme düzlemleri.	57
Şekil 5.31: k-ε modeli için görüntüleme noktalarında kütle oranı-zaman grafiği.	58
Şekil 5.32: LES modeli için görüntüleme noktalarında kütle oranı-zaman grafiği. ..	58
Şekil 5.33: DES modeli için görüntüleme noktalarında kütle oranı-zaman grafiği... ..	59
Şekil 5.34: Tavan jeti düzleminde (2,5 m) sıcaklıkların zamana bağlı karşılaştırması.	60
Şekil 5.35: k-ε modeline göre GN1 ve GN2 ölçüm noktalarında sıcaklık-zaman grafiği.	61
Şekil 5.36: LES modeline göre GN1 ve GN2 ölçüm noktalarında sıcaklık-zaman grafiği.	62
Şekil 5.37: DES modeline göre GN1 ve GN2 ölçüm noktalarında sıcaklık-zaman grafiği.	62
Şekil 5.38: Yangın başlangıcından 280 saniye geçtikten sonra sağdaki yangın kaynağındaki logaritmik CO ₂ kütle oranı.....	63
Şekil 5.39: Sağdaki yangın konumunda 280 saniye sonunda 0,002 kütle oranı CO ₂ duman eş değer yüzeyi.	63
Şekil 5.40: Yangın başlangıcından 280 saniye geçtikten sonra sağdaki yangın kaynağında [°K] cinsinden logaritmik sıcaklık dağılımı.	63
Şekil 5.41: Çalkantı modelleri için 30 saniye sonunda sağdaki yangın kaynağının hız alanı karşılaştırması.	64
Şekil 5.42: 30 saniye sonunda alev merkezine farklı uzaklıklardaki yükseklikler için V _z hızlarının radyal yönde konuma bağlı karşılaştırması.....	65
Şekil 5.43: Çalkantı modelleri için 30 saniye sonunda sağdaki yangın kaynağının etrafındaki sıcaklık alanının logaritmik ölçekle karşılaştırılması.....	66
Şekil 5.44: 30 saniye sonunda alev merkezine farklı uzaklıklardaki yükseklikler için sıcaklıkların radyal yönde konuma bağlı karşılaştırması.	67
Şekil 5.45: Alev merkez eksen sıcaklıklarının beklenen değerleriyle benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.	68

SEMBOL LİSTESİ

A_L	: Doğrusal anizotropi sayısı
D_a	: Düzeltme algoritması
D_k	: k kimyasal türüne ait yayınım katsayısı
E_{bf}	: Frekansa bağlı karacisim ışıması ısı akısı
E_t	: İç enerji
G	: LES modelinde filtre fonksiyonu
G_f	: Alınan (gelen) ışıınım ısı akısı
I_b	: Karacisim ışıması kaynaklı ışıınım güç yoğunluğu (intensite)
I_f	: Frekansa bağlı toplam ışıınım güç yoğunluğu (intensite)
K	: von Karman sabiti
K_{af}	: Frekansa bağlı soğurma katsayısı
K_{sf}	: Frekansa bağlı saçılma katsayısı
L_t	: Çalkantılı uzunluk ölçeği
Q	: Değiştirilen ısı enerjisi
$\dot{Q}$	: Isı enerjisinin zamana göre türevi
$\dot{Q}_c$	: Yangın kaynağı taşınımsal ısı akısı
$\dot{Q}_a$	: Yağmurlama sistemi devreye girmesi anında yangın gücü
Re	: Reynolds sayısı
S_i	: i özelliğine ait kaynak terim
T	: Mutlak sıcaklık
T_m	: Yangın merkez eksen sıcaklığı
$\vec{U}$	: Hız alanı
V	: Hacim
V_k	: Kontrol hacmi değeri
Y_k	: k numaralı kimyasal türün kütle oranı
c	: Işığın boşluktaki hızı
c_p	: Sabit basınç altında birim kütle başına özgül ısı
f_y	: Yüzey kuvveti
f	: Işıınım frekansı
$\vec{g}$	: Yerçekimi ivmesi
h	: Entalpi
h	: Planck sabiti
k	: Isı iletim katsayısı
k_B	: Boltzmann sabiti
n	: Kırılma indisi
$\hat{n}$	: Yüzeye dik doğrultuda birim vektör
n^+	: Yüzeyden dik yönde uzaklık
p	: Basınç
$\dot{q}_i$	: u_i hız bileşeni doğrultusunda birim alandan geçen ısı akımı

q_{rf}	: Frekansa bağılı birim alandan geçen ısı akımı
$\hat{q}$	: Yön kazandırmak için kullanılan birim vektör
$\vec{r}$	: Konum
$\vec{s}$	: Doğrultu vektörü
s	: Yol uzunluğu koordinatı
t_a	: Yağmurlama sisteminin devreye girdiği zaman anı
u_j	: Hız alanının j bileşeni
u	: Hız alanının x bileşeni
v	: Hız alanının y bileşeni
w	: Hız alanının z bileşeni
x_j	: Konumun j bileşeni
y^+	: Duvar dibinde boyutsuzlaştırılmış dik yönde uzaklık
Δ	: Sayısal ağ eleman kenar uzunluğu
Δn_j	: Ayırıklaştırılmış kontrol hacmi yüzey normalinin j bileşeni
Δy	: Duvar dibinde duvardan dik yönde uzaklık
Δt	: Zaman değişimi
Φ	: LES modelinde filtrelenen bir büyüklük
Γ	: Saçılma içi faz fonksiyonu
Λ^h	: h sıklık seviyesinde sayısal ağ
$\overline{\psi}$	: Herhangi bir ψ büyüklüğünün ortalama değeri
ψ'	: Herhangi bir ψ büyüklüğünün çalkantılı bileşeni
ψ^o	: Herhangi bir ψ büyüklüğünün bir zaman adımı önceki değeri
ψ^{oo}	: Herhangi bir ψ büyüklüğünün iki zaman adımı önceki değeri
$[\psi]$	: ψ matrisi
α	: Yangın büyüme hızı katsayısı
δt	: İterasyonun zaman adımı
ε	: Çalkantılı kinetik enerjinin yıkım miktarı (epsilon)
ϕ	: Sayısal ağın herhangi bir düğümünde saklanan skaler bilgi
$[\phi]$	: Sayısal ağın herhangi bir düğümünde saklanan vektörel bilgi (ilkel değişken)
κ	: Çalkantılı kinetik enerji
μ	: Vizkozite
μ_t	: Çalkantılı viskozite
ν	: Kinematik viskozite
σ	: Stefan-Boltzmann sayısı
σ_p	: Çalkantılı Schmidt sayısı
τ_{ij}	: Gerilim tansörü
τ_{turb}	: Çalkantılı kayma gerilmesi

KAPALI OTOPARKLARDA TAŞIT YANGINININ SAYISAL BENZETİMİNE YÖNELİK K-EPSİLON, LES ve DES ÇALKANTI MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Kapalı bir otoparkın yeraltında kalan bir bodrum katında aynı anda çıktığı düşünülen iki binek taşıt yangını sayısal olarak modellenmiştir. Yangın başlangıcından itibaren 9 dakika sonuna kadar geçen fiziksel olay örgüleri zamana bağlı olarak çözdürülmüştür. Çalkantı modeli olarak kullanılan k-epsilon ($k-\epsilon$), LES ve DES'ten elde edilen sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üç farklı çalkantı modelinin ayrı ayrı sonuçlarını elde etmek için probleme ait tüm parametreler sabit tutulmuş olup değişiklik yalnızca çalkantı modeli olmuştur. Zamana bağlı Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri, süreklilik denklemi, enerji denklemi, kimyasal tür taşınım denklemi, çalkantı denklemleri ve ilişkili oldukları ışıınım modeli ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan CFX aracılığıyla çözülmüştür.

Her model benzetiminde de kullanılan sayısal ağ yapılandırılmamış ağıdır. Yangından üreyen dumanın kat tavanından ilerleyecek olması dolayısıyla sayısal taşınırılığın etkin kılınabilmesi amacıyla tavana yakın bölge daha sık bir ağ yapıyla yapılandırılmış olup yangın kaynağının olduğu bölge için karakteristik yangın uzunluğu da dikkate alınmıştır.

Taşıtlar yangınları, yangını temsil eden esas özellikler olan taşınımsal yangın gücü, duman üreme debisi ve alev kaynağının ortama ışıınım yoluyla yaydığı enerji bakımından kaynağın yüzey sıcaklığının doğru değerlerle sınır koşulu olarak tanımlanmasıyla modellenmiştir. Bodrum kat otopark hacmine açık havadan besleme yapan taze hava fanları ve oluşan kirli havayı ortamdan dışarı atan duman egzoz fanlarının işlevleri de fan değerlerine karşılık gelen hacimsel debi giriş ve çıkış sınır koşullarıyla tanımlanmıştır. Ortamda gaz sevkine yardımcı olan jetfanlar ise birer hacimsel momentum kaynağı olarak modellenmişlerdir. Taşıtlar yangını koşullarının zamana bağlı oluşu dolayısıyla problemin benzetimlerinde kullanılan sınır koşulları ticari HAD yazılımına ait bir ifade diliyle özelleştirilmiştir.

Elde edilen benzetim sonuçları otopark katının farklı kot düzlemlerinde duman yoğunluğunu temsilen CO_2 kütle oranları ve sıcaklıklar bakımından karşılaştırılmıştır. Bunun dışında yangın kaynağından üreyen duman jetine ait analitik çözüm bilgisi benzetimden elde edilen sayısal sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Sonuç görüntüleme düzlemlerinde CO_2 kütle oranları bakımından k- ϵ modelinin verdiği sonuçlar LES ve DES 'ten farklılık göstermiştir ancak sıcaklık değerleri üç modelde de birbirine çok yakındır. Hesaplama uzayında tanımlanan görüntüleme noktalarından alınan verilere göre ise k- ϵ sonuçları hem kütle oranı hem de sıcaklık davranışları bakımından LES ve DES 'ten belirgin farklılıklar ve her üç modelden de elde edilen yangın kaynağı merkez eksen sıcaklığı değerleri de analitik çözümle neredeyse uyumlu davranış göstermiştir.

COMPARISON OF K-EPSILON, LES AND DES TURBULENCE MODELS TOWARDS NUMERICAL SIMULATION OF AUTOMOBILE FIRES IN ENCLOSED CAR PARKS

SUMMARY

The last quarter of the past century was the beginning of the rise of fire modelling and simulation by using computers. The rate of influence and the transient character of the behavior of the smoke produced by an automobile fire beginning in an underground car park depending on the boundary conditions of the medium is important to be understood for fire numerical simulations and fire safety engineering. After the beginning of the usage of numerical methods in fire safety engineering possible fire scenarios can be solved numerically as computer simulations for concluding human escape routes and escape durations during emergency, the capabilities of the smoke extraction systems and etc. Additionally numerical fire solutions gives the ability to designers, engineers or architects to make architectural design developments towards fire conditions. The safety of the decisions made in the design period for an enclosed space like an enclosed car park by using numerical simulations is strictly related with the correct turbulence model to be used.

Two automobile fires assumed as simultaneously burning which are thought to be occurring in an underground car park storey has been numerically modelled in this thesis to understand the behavior nature of different turbulence models acting on exactly the same conditions in different simulations and to catch some differences between them. Physical phenomena has been solved transiently from the beginning of the fire till the end of the 9th minute. The numerical results obtained from k-epsilon ($k-\epsilon$), LES and DES turbulence models are compared. All the problem parameters were set constant for the case of obtaining the unique effect of each turbulence model separately. Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes (URANS) equations, energy equation, chemical species transport equation, turbulence equations and related radiation model (radiation transport equation) were solved by the commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) software CFX.

The mesh used in each of the simulations is an unstructured mesh containing 1,5M elements and 317k nodes. For improving numerical dispersion, because the smoke produced from the fires moves as a ceiling jet, the mesh resolution at the ceiling region was made fine with an element growth rate of 1.1 with no boundary mesh adaptation. Additionally for a well modelling of a fire source, the mesh region around the fire sources were especially made finer taking the characteristic length for fire sources into account. The mesh quality has been checked with different mesh quality parameters. An unstructured mesh in mass formed of tetrahedral elements is used commonly for all the simulations. With this thesis work, the limit and type of mesh independency was not sought by the author so that the results of this thesis can be concluded as the comparison of different turbulence models (which could be more efficient in a finer or more proper mesh) in the same conditions of which the one is mesh resolution.

Car fires were modelled using the primary source properties as the boundary conditions which are convective heat flux of the source, smoke production mass flow rate and the fire source surface temperature for well defining the radiative properties of the source. The activity of the smoke extraction fans which are located in the exhaust shafts of the car park are defined as outlet volumetric flow formed of uniform velocities in the outward normal direction of the exhaust shaft ends. Similarly the activity of the fresh air supply fans are inlet volumetric flow boundary conditions in the numerical side at the fresh air supply shaft ends formed from uniform inlet velocities directed inward normally. There is additionally one type of fan more acting in the flow solution which are the jetfans. Jetfans are co-working with the smoke extraction system helping the smoke extraction fans by injecting the smoke in the medium to near the attraction border of the exhaust (extraction) shafts. Jetfan activity has also been modelled by volumetric momentum sources in a transient character. Not only the jetfans, all the boundary conditions of the problem are time dependent so the transient character of the boundary conditions were defined with a specialized expression language within the solution software named as CFX expression language (CEL). Fire sources' heat release rates has also been defined time dependent to obey the t^2 fire growth curve rule and exponential decay rule during the decay period after the sprinkler system activation. Exponential decay behavior is assumed to be initiated coherent with the time which the growth curve reaches a fire heat release rate peak value of 5 MW when the sprinkler system is activated.

As the radiation properties for the simulations, the radiation transport equation and the related blackbody radiation equations are solved by CFX with independency from spatial direction (isotropy) for the radiation intensity or the P1 Radiation Model. In addition to radiation properties frequency independency or the Gray Gas approximation is also used. All the walls of the computational domain are assumed to be adiabatic walls because of the location of the 3rd underground storey which is assumed to be surrounded by earth which is a perfect isolator. For the case of boundary layer solution, standard wall functions are used with logarithmic inner layer. The 3rd underground storey's medium is connected by car ramps to the upper floors. It was presumed to take the fluid medium of the upper floors into account when constructing the solid model of the computational domain but this was going to load a big charge on computational efficiency and solution time so that ramp exits were designed to supply similar conditions to the reality by linking to a semi-spherical free entrainment boundary with 20°C temperature and 1 atm static pressure conditions.

The algebraic multigrid solution (AMG) method with finite volume discretization of the flow equations has been used in the flow simulation software. SIMPLE has been the pressure-velocity coupling algorithm during solutions. In the simulation software, AMG solution is accomplished by a modified algorithm named as Multigrid Accelerated Incomplete Lower Upper Factorization or shortly MG-ILU. For spatial iterations 1st Order Forward Differencing or Central Forward Differencing schemes are used blendly and for time iterations First Order Backward Euler scheme is used.

In the simulations a time step size of 0,25 second is used with total physical simulation duration of 540 seconds. The convergence criteria was to achieve a residual of 10^{-9} or to pass to the continuing time step after 20 inner iterations. There has been no residual value observed to stand bigger than 10^{-5} . An HP Z600

workstation containing an Intel Xeon CPU with 6 physical and additionally 6 imaginary cores with 16 GB of rams included was used for simulations.

The obtained simulation results has been compared for mass fractions of CO₂ representing smoke density for different height levels and temperatures in the underground storey. Additionally the analytical solution made for the fire plume and the smoke jet moving towards the ceiling emerging from the fire source was also compared with the numerical results. The results obtained from the simulations in the result monitoring planes from the k- ϵ model are typically different than LES and DES but the same can't be mentioned for temperature distributions transiently. Temperatures are always near the same values depending on the contour plots for each turbulence model. When the results obtained from the monitoring points defined previously in the solution domain are compared the k- ϵ model differs distinctly in mass fraction distribution and also temperature distribution from LES and DES models both. All the fire plume centerline temperature distribution results for each turbulence model are nearly the same in character and values with the analytical solution. Literary survey has shown that the fire temperature at the engine compartment of an automobile gradually reaches nearly 900°C at 420 seconds and linearly reaches the design fire source surface temperature of nearly 500°C at nearly 300 seconds. The numerical simulation results for the turbulence models has shown some differences at the fire source location in temperatures which could be concluded depending on the mesh resolution. For all the three turbulence models the adiabatic flame temperature for methane combustion (2210°K) which has been chosen as the guide chemical mechanism for the design fire simulation and behavior has been observed at a near top location from the fire source. Without using a reactive flow computation, by using the appropriate boundary conditions it is accepted that fire modelling as made in this thesis is acceptable and enough for smoke production and diffusion simulations.

1. GİRİŞ

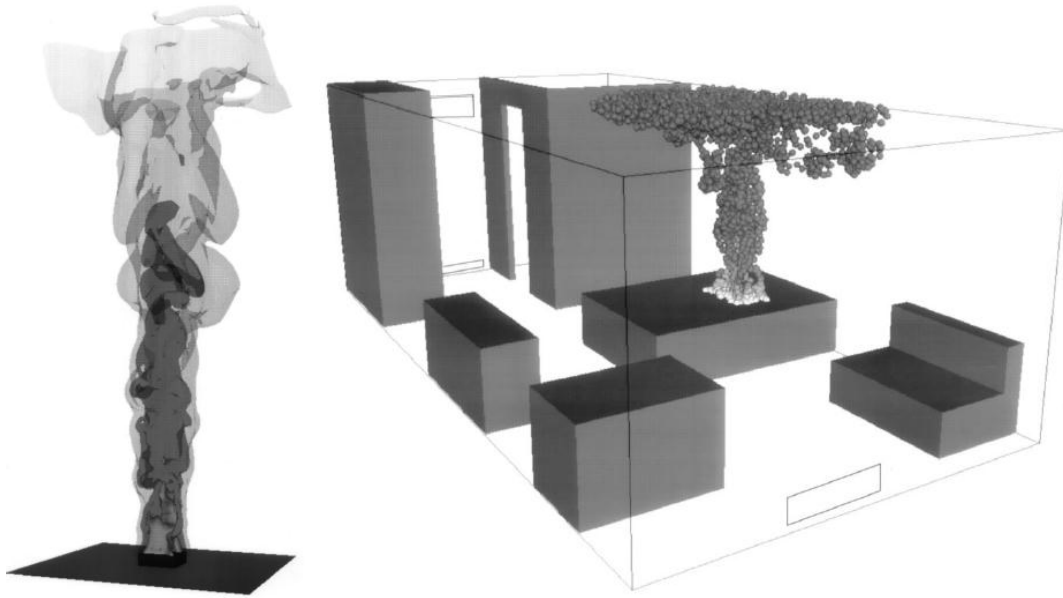
Geçtiğimiz yüzyılın son çeyreği yangının bilgisayarda benzetiminin sıklıkla kullanılmaya başlandığı bir dönemdir. Kapalı yeraltı otoparklarında oluşabilecek bir yangının ve ürettiği dumanın, ortamın sınır koşullarından ne şekilde etkileneceği ve daha önemlisi zamana bağlı olarak nasıl davranacağını kestirilmesi güç bir iş olup, HAD yangının zamana bağlı davranışını anlamada büyük bir kurtarıcı rolü oynamaktadır. Sayısal yöntemlerin yangın güvenliği mühendisliğinde kullanılmasıyla birlikte, olası yangın durumları bilgisayar benzetimi olarak çözülebilmekte, yangın anında insanlar için kaçış sürelerinin yeterliliği, yangın duman egzoz sistemlerinin kabiliyetleri araştırılabilmekte ve hatta daha da önemlisi yangına yönelik mimari tasarım iyileştirmeleri yapılabilmektedir. Bu kararların alınması uygulanan model parametrelerinin doğruluğuna, diğer bir deyişle akış problemini tanımlayan tüm koşullara bağlıdır. Şüphesizdir ki karmaşık bir akışkanlar mekaniği problemini doğru çözmek için kullanılan HAD'nin uygulanmasında en önemli ön koşullardan biri doğru ve deneysel verilerle uyumlu bir çalkantı (türbülans) modelinin kullanılmasıdır.

1.1 Yangın Modellemesinde HAD'nin Kullanımı

Yangın güvenliği mühendisliği alanında HAD'nin kullanımı yangının doğru özelliklerle tanımlandığı ve tepkimeli olmayan bir akış çözümüyle gerçekçi miktarda sağlanabilmektedir. HAD'nin yangın modellemesine yönelik kullanımında geniş çevrelerce standart k- ϵ modeli yeterli bulunmaktadır. Bu çalışmanın kapsamını oluşturan çalkantı modellerinin karşılaştırılması, standart k- ϵ hariç diğer modellerin standart k- ϵ modeline nazaran farklılık gösteren sonuçlar ortaya çıkarıp çıkarmadığını anlamaya yönelik olarak düşünülmüştür. DES ve LES modelleri standart k- ϵ modeline göre hesaplama gereksinimleri açısından daha yüksek performans ve zaman gerektirmektedir. Her üç modelin kullanımında da aynı yapılandırılmamış sayısal ağ (UM) kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına dayalı olarak standart k- ϵ modelinin yangın modellemelerinde sözkonusu olan yeterliliği

sınanmıştır. Buna ek olarak da DES ve LES modelleri de kendi içlerinde karşılaştırılmaktadır.

Yangın olgusu temel özellikleri açısından sesaltı hızlarda gerçekleşen yanmanın (deflagrasyon) tetiklediği ve kaldırma kuvveti etkisinde (yerçekiminin etkisinde) bir akış olgusudur. Bu olgu yalnızca çalkantı modellerinin farklı olduğu üç farklı çözümle, fiziksel olay örgüsünün 9. dakika sonuna kadar incelenmesi ile karşılaştırılmaktadır. Zaman kısıtları ve hesaplama performansının sınırlılığı nedeniyle incelenen süreç daha fazla uzatılmamıştır.



Şekil 1.1: Yangın kaynağında deflagrasyon ve duman üremesi, K. B. McGrattan (1998)'den uyarlanmıştır.

1.2 Karşılaştırmada Kullanılan Çalkantı Modelleri

Bu çalışmada geometri, sınır koşulları, interpolasyon şeması, çözüm tekniği ve model parametreleri aynı olmak suretiyle üç farklı türbülans modeli ile çözüm senaryoları tekrarlanmıştır. Böylece çözüme türbülans modelinin etkisini anlayabilecek şekilde bir benzetim tasarımı (DoS) yapılmıştır. Karşılaştırılan çalkantı modelleri standart k- ϵ , DES ve LES modelleridir.

1.2.1 Karşılaştırılan çalkantı modellerinin ön araştırmaya dayalı zayıflık ve üstünlükleri

Açıkça bilinen avantajlarına dayalı olarak, iki denklemlili $k-\epsilon$ modeli uygulamada çok geniş alanda kullanım bulmaktadır. Sıklıkla kullanılan ve kendini çok farklı HAD uygulamalarında kanıtlamış olan $k-\epsilon$ modeli, sayısal olarak kararlı ve hesaplama performans gereksinimi bakımından çok pahalı değildir (Carlsson, 1999). Çalkantı modellerinden $k-\epsilon$ model ailesi, yangın tarafından tetiklenen akış alanlarını modellemede sıklıkla kullanılmaktadır (W.K.Chow ve diğ., 2011). Bu açıdan bakılacak olursa $k-\epsilon$ modeli, HAD alanında en fazla doğrulanmış çalkantı modelidir denilebilir. Buna rağmen bu model için bile bazı dezavantajlar ortaya konmuştur. Bu modelden ortaya çıkan iki belirsizlik sayılabilir. Birincisi Bossinesq Eddy Viskozite olayı ve ikincisi de çalkantılı kinetik enerjinin yıkım (disipasyon) denkleminin türetilmesinde yapılan kabullerdir (Carlsson, 1999).

Bossinesq eddy vizkozite kabulü ile yerel uzayda yönden bağımsızlık (izotropi) sözkonusudur ancak gerçek hayattaki bir yangında bu sözkonusu değildir. $k-\epsilon$ modelinin tepkimeli akışta yangın alevinin genişliğini olması gerekenden daha küçük olarak hesaplamaya yatkın olduğu bulunmuştur. Tavan jetine olan duman katılımını olması gerekenden daha yüksek bir debide hesapladığından duman yayılım hızını normalden fazla hesaplamaya eğilimlidir. Deneyler ile $k-\epsilon$ modeli arasındaki karşılaştırmalarda görülmüştür ki gerçekte yerçekimine bağlı olarak çalkantılı kinetik enerjinin üretim hızı, $k-\epsilon$ modelinin öngördüğünden çok daha fazladır (Carlsson, 1999).

LES tüm akış uzayında RANS formülasyonunu kullanmaktadır (Zhixin, 2008). LES modeli yüksek hesaplama perfomansı ihtiyacı dolayısıyla yangın benzetimlerinde genellikle tercih edilen bir çalkantı modeli olmayıp yerine DES modeli kullanılabilir. DES modelini LES'e göre daha fazla tercih edilebilir kılan hesaplama performansı bakımından LES kadar yüksek gereksinim duymamasıdır. DES duvarlara çakışık hücrelerde RANS formülasyonu kullanmaktadır (Zhixin, 2008).

2. ÇALKANTI DENKLEMLERİ

2.1 Çalkantı Olgusu ve Modelleme

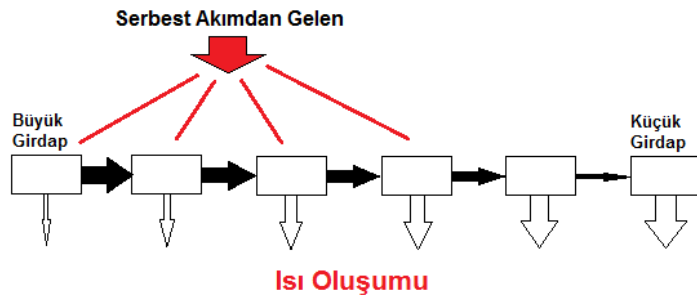
Çalkantı Reynolds Sayısı ile karakterize edilebilir.

$$Re = \frac{u_{kar} x_{kar} \rho}{\mu} = \frac{u_{kar} x_{kar}}{\nu} \quad (3.1)$$

Burada u_{kar} karakteristik hız (genellikle akışın ortalama hızı olarak alınır), x_{kar} ortalama akışın karakteristik uzunluğu, ρ akışkan yoğunluğu, μ ve ν 'de akışkanın dinamik ve kinematik viskoziteleridir. Reynolds sayısı ataletsel kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranını temsil eder.

Büyük boyutta girdaplar (eddy) akışı oluşturan herhangi bir nedene bağlı olarak da oluşabilir. Bir yangında, büyük boyutlu girdapların oluşmasına neden olan süreç ve olayı oluşturan kuvvet kaldırma kuvvetidir (buoyancy) (Carlsson, 1999). Yangın olgusu için “kaldırma kuvveti tarafından yönetilen akış (buoyancy dominated flow)” tabiri de kullanılır.

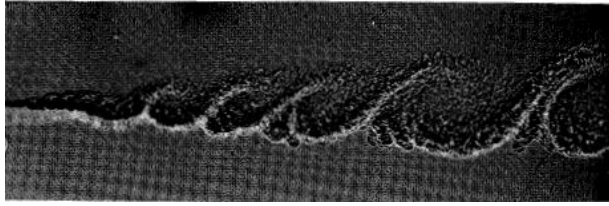
Büyük ölçekli girdapların birbirleriyle etkileşimleri daha küçük boyutlara parçalanmalarına neden olur ve bu süreç girdapların gittikçe küçüldüğü ve ulaştığı boyutta viskozitenin atalet kuvvetlerini yenebilir hale geldiği duruma kadar devam eder. En küçük boyutlu girdaplarda bile enerji ısıya dönüşür ve çalkantılı hal ortadan kalkar (laminer akışa geri dönüş olur). Bu hal, çalkantıya neden olan farklı akışkan katmanlarının karışmayı tamamlaması haline de işaret eder.



Şekil 2.1: Çalkantılı kinetik enerjinin yıkımı, Carlsson (1999)’dan uyarlanmıştır.

Çalkantı uzaysal ve zamansal açıdan düzensizlik ve rastgelelik olarak ifade edilebilecek olsa da çalkantının kendisi de doğanın temel yasalarına (korunum yasaları) uymak zorundadır. Çalkantının matematiksel yapısına bağlı olarak, bilgisayar benzetimlerinde de uzay ve zamanda rastgelelik hakim olacaktır. Bu durum “belirlenimci kaos” olarak da adlandırılabilir. Bu, aynı koşullar ve aynı başlangıç ve sınır koşulları altında gerçekleşen iki farklı yangının iki farklı şekilde gelişeceği anlamına da gelir (Carlsson, 1999).

Çalkantılı akışı çözmek için kullanılan modellerden biri LES olup uzaysal çözünürlüğün en büyük boyutlu girdapları dahi kapsayabileceği bir yapısı bulunduğu gibi modelin en küçük girdapları da kapsayabilecek bir yapısı söz konusudur. LES, DES ‘e göre çok daha fazla hesaplama performansı gerektirmektedir. LES modeline de yakın gelecekte yangın mühendisliğinde kullanılabilecek bir model gözüyle bakılmamaktadır (Carlsson, 1999).



Şekil 2.2: Karışma uzunluğunu tamamlamayan iki akışkanın arayüzünde çalkantı, White (1991)’den uyarlanmıştır.

2.2 Yangında Karakteristik Uzunluk ve Çalkantılı Akışa Geçiş

Yangın kaynağı ve kaynaktan çıkan dumanın çalkantılı akışa geçişini karakterize etmek için Reynolds sayısının yazımında kullanılacak bir karakteristik uzunluğa ihtiyaç duyulur. Bir yangın kaynağı için karakteristik uzunluk toplam yangın gücü

$\dot{Q}$, ρ_∞ kaynağa uzaktaki akışkan ortamın yoğunluğu, T_∞ kaynağa uzaktaki akışkan ortamın ortalama sıcaklığı, c_p akışkan ortamının birim kütle başına sabit basınçtaki özgül ısı ve g ’de yer çekimi ivmesi olmak üzere aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir (McGrattan ve diğ, 1998).

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty T_\infty c_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (3.2)$$

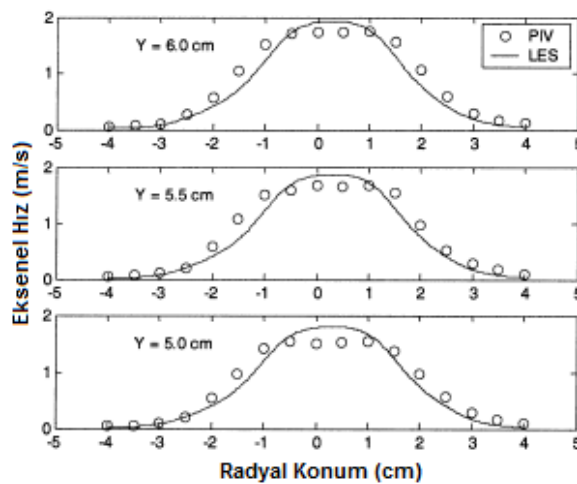
içinde sıcaklık duman jeti kesiti içinde değişim göstermektedir ve yangın kaynağı merkez ekseninde doruk değerine ulaşır.

Heskestad'ın (1986) yangın merkez eksen sıcaklığı denklemi z yangın sanal merkezinden düşey yönde uzaklık olmak üzere ortam sıcaklığı olarak 293 °K (20+273), 1,2 kg/m³, yerçekimi ivmesi için 9,8 m/s² ve C_p = 1,00 kJ/kg°C kullanıldığı takdirde

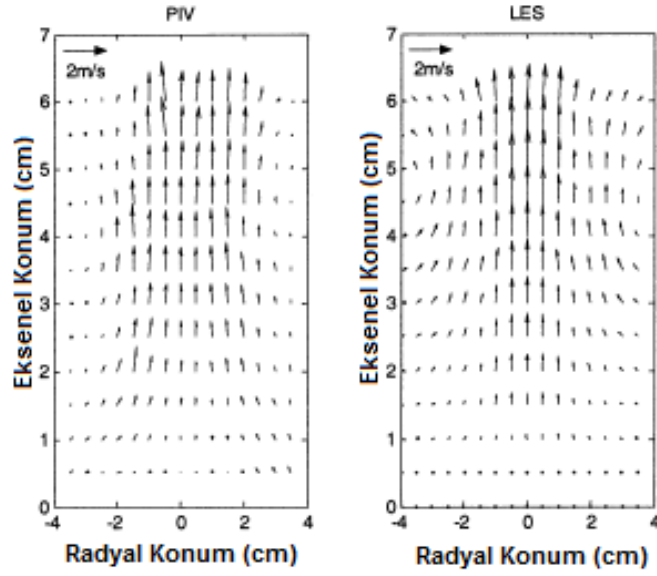
$$T_M = T_o + 25 \frac{\dot{Q}_c^{2/3}}{(z - z_o)^{5/3}} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılır. Burada T_o ve T_{cp} 'nin birimleri °C'dir.

Kaldırma (buoyancy) kuvvetinin etkisinde yakıt havuzunda oluşan bir yangının LES modeliyle simüle edildiği bir çalışmada hem bir üç boyutlu helyum yangını benzetimi hem de türbülanslı metan-hava yanması ile bir yangın modellenmiş ve PIV tekniğiyle alınan deney görüntüleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın kapsamındaki yangın kaynaklarının modellenmesinde kullanılan yangın kaynağından skalerlerin ortama taşınımı ile yapılan benzetimle çok benzer olan bu çalışmadan alınan sonuç ve yorumlar önemlidir. Kullanılan yangın gücü aynı olmamakla beraber yangının modellenmesinde yapılan benzetimin PIV sonuçlarıyla olan uyumu dikkat çekicidir. 818,2 kW/m² yangın gücü akısıyla ortama 7,1 cm çaplı bir yakıcıdan yangın modellenmiştir.



Şekil 2.4: Yangın kaynağı ve jeti içinde farklı yüksekliklerde ölçülen ve beklenen hızlar, Xin ve diğ. (2002)'den uyarlanmıştır.



Şekil 2.5: Anlık ölçülen ve beklenen hız alanının karşılaştırılması, Xin ve diğ. (2002)’den uyarlanmıştır.

Xin ve diğ. (2002)’ye göre “Kaldırma kuvveti etkisindeki türbülanslı akışların üç boyutlu ve tepkimeli olmayan bir LES modellemesi, iki boyutlu benzetim kullanılan modellemelere göre skalerler ve hızlar hakkındaki beklenen değerleri daha iyileştirmektedir. Yakıcı çıkışından itibaren her yükseklik seviyesinde üç boyutlu benzetimlerden elde edilen beklentiler ile deney verileri uyumludur”.

2.4 Sayısal Çözüm Yönelik Çalkantılı Akış Denklemleri

RANS denklemleri, maddesel türevin açık halde yazımı ve çalkantılı viskoziteyi de içerecek şekilde ve zamana bağlı terimleri de barındırarak (salınım yapan fiziksel gözlemlenirlerin sadece ortalamalarını barındırmayan çalkantılı bileşenleri ile toplamı olan tam değerleri ile yazıldığında) URANS denklem takımını verir. Reynolds Ortalama Navier Stokes Denklemleri’nin (RANS : Reynolds Averaged Navier-Stokes) kapalı formunun ifadesi:

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i' u_j'}) = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{U} \quad (2.3)$$

– $\overline{\rho u_i' u_j'}$ şeklindeki terimler çalkantılı gerilim tensörü bileşenleridir.

$$-\rho \overline{\vec{U}' \otimes \vec{U}'} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \begin{bmatrix} \sigma'_{xx} & \tau'_{xy} & \tau'_{xz} \\ \tau'_{xy} & \sigma'_{yy} & \tau'_{yz} \\ \tau'_{xz} & \tau'_{yz} & \sigma'_{zz} \end{bmatrix} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Buna ek olarak süreklilik denklemi, çalkantı yönünden Reynolds Ortalaması alınmış halinden bir farklılık göstermeyecektir çünkü yangın modellemesinde akışı sıkıştırılamaz kabul etmekteyiz. Sıkıştırılamaz akış için süreklilik denklemini hatırlayalım :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (2.5)$$

buna göre ortalaması alınmış sıkıştırılamaz akış için süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

Bunun dışında URANS denklemleri de toplu gösterimde yazılabilir. $\vec{U}$ ortalama hızlardan yazılan vektörü $\vec{u}$ 'da türbülanslı hız bileşenlerinden oluşan hız vektörü olsun. Ayırıklaştırılmış sayısal hesaplama uzayının herhangi bir hücresinde oluşacak bir kimyasal tepkimeden kaynaklı olarak oluşabilecek bir momentum kaynak terimini de barındırarak URANS denklemleri toplu gösterimi

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \left(\tau - \rho \overline{\vec{U}' \otimes \vec{U}'} \right) + S_M \quad (2.7)$$

olarak yazılır (S_m momentum kaynak terimidir). Enerji Korunum Denkleminin de kimyasal tepkimelerden gelecek kaynak terimini ve çalkantılı enerji akısını da içerecek biçimde yazılabileceği düşünülürse Ortalama Enerji Denklemi entalpi cinsinden yeniden yazılabilir. Burada entalpinin $h=c_p T$ eşitliğinde belirtilen temel termodinamik bağıntıyla ifade edildiğini bilmeliyiz.

$$\frac{\partial \rho h_{top}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U} h_{top}) = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T - \rho \overline{\vec{U}' h_{top}}) + \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{U} \cdot \left(\tau - \rho \overline{\vec{U}' \otimes \vec{U}'} \right) \right) + S_E \quad (2.8)$$

Burada τ laminar kayma gerilmesi ve $\rho \overline{\vec{U}' h_{top}}$ vektörü çalkantılı enerji akısı terimidir. $\vec{\nabla} \cdot \left(\vec{U} \cdot \left(\tau - \rho \overline{\vec{U}' \otimes \vec{U}'} \right) \right)$ terimi de viskoz iş terimi olup sayısal çözümde istenirse denklemlere dahil edilebilmektedir (ANSYS Inc., 2009).

İlerideki bölümlerde anlatılan sayısal çözümlerde viskoz iş terimleri çözüm için dahil edilmiştir. Ortalama toplam entalpi Denklem 3.34'te yazıldığı gibi ifade edilir.

$$h_{top} = h + \frac{1}{2} \bar{U}^2 + \kappa \quad (2.9)$$

Buradaki κ sayısı çalkantılı kinetik enerjidir ve hız vektörünün çalkantılı bileşenleri ile yazılır:

$$\kappa = \frac{1}{2} \overline{\bar{U}^2} = \frac{1}{2} \overline{\bar{U} \cdot \bar{U}} \quad (2.10)$$

Çalkantının dahil edildiği kimyasal tür korunum (skaler taşınım) denklemi de, sözkonusu skalerin kimyasal tepkimelerle üreyebildiği düşüncesini de barındıran kaynak terimiyle yeniden yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \bar{U} Y_k) = \vec{\nabla} \cdot (D_k \vec{\nabla} Y_k - \rho \overline{\bar{U}' Y_k}) + S_k \quad (2.11)$$

2.5 k-Epsilon (k-ε) Çalkantı Modeli

k-ε Çalkantı Modeli, sanal viskoziteli çalkantı modellerindendir. k-ε Çalkantı Modelinde çalkantılı kinetik enerji denklemi ve çalkantılı kinetik enerji denkleminin yıkımı model ile temel akış denklemlerine eklenen iki ana denklemdir. Çalkantılı kinetik enerji denklemi (k):

$$\frac{\partial (\rho \kappa)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \bar{U} \kappa) = \vec{\nabla} \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \vec{\nabla} \kappa \right] + P_k + P_{kb} - \rho \varepsilon \quad (2.12)$$

ve çalkantılı kinetik enerjinin yıkımı denklemi ise

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \bar{U} \varepsilon) = \vec{\nabla} \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \vec{\nabla} \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} (P_k + P_{kb}) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (2.13)$$

olarak yazılır. Çalkantılı viskozite

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (2.14)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. C_μ , σ_κ ve σ_ε sayıları sabit birer model sayısıdır. Bu denklemlerdeki P_k viskoz kuvvetlere bağlı olarak çalkantı üretim sayısıdır ve

$$P_k = \mu_t \vec{\nabla} \bar{U} \cdot (\vec{\nabla} \bar{U} + \vec{\nabla} \bar{U}^T) - \frac{2}{3} \vec{\nabla} \cdot \bar{U} (3\mu_t \vec{\nabla} \cdot \bar{U} + \rho \kappa) \quad (2.15)$$

olarak ifade edilir. P_{kb} ise kaldırma (buoyancy) kuvvetleri etkisiyle oluşan çalkantı üretim sayısıdır. Yangın olgusunda bu sayının etkisi büyük öneme haizdir. İfadesi

$$P_{kb} = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} \bar{g} \cdot \bar{\nabla} \rho \quad (2.16)$$

şeklinde dir. $C_{\varepsilon 1}$ ve $C_{\varepsilon 2}$ sayıları birer model sayısı olup sabit sayılabilecek değerleri vardır. Yukarıdaki denklemde σ_p Çalkantılı Schmidt Sayısı'dır. Bossinesq sanal viskozitesinin kullanılması halinde değeri $\sigma_p = 0,9$ ila 1 arasında değişmektedir. P_{eb} sayısı da çalkantılı kinetik enerjinin yıkım denkleminde kaldırmanın etkisini katar ve θ hız vektörü ile yerçekimi ivme vektörü arasındaki açı olmak üzere

$$P_{eb} = C_3 \max(0, P_{kb}) \sin \theta \quad (2.17)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu fonksiyon bir maksimum fonksiyonu olup minimum değeri sıfırdır. C_3 sayısı, modelde kullanılışı itibariyle türbülanslı kinetik enerjinin yıkımı (disipasyon) katsayısı olup $C_3 = 1$ genel kullanım değeridir.

2.6 LES Çalkantı Modeli

LES çalkantı modelinin altında yatan ana fikir büyük ve küçük sanal (eddy) akışların ayrıştırılması, diğer bir deyişle de filtrelenmesidir. LES modelinde kullanılan akış denklemleri zamana bağlı Navier-Stokes denklemlerinin fiziksel (reel) uzayda filtrelenmesiyle elde edilmektedir. Filtreleme işlemi, sayısal ağ elemanlarının büyüklüğü yada filtreleme genliğinden daha küçük boyutta eddy akışları/hareketleri filtreleyerek temizler. Sonuçta kalan denklemler ölçek itibariyle elle tutulabilecek büyüklükteki eddy hareketleri kapsar (ANSYS Inc., 2009).

Filtrelenmiş bir büyüklük (üstçizgiyle ifade edilebilir) şöyle tanımlanır:

$$\bar{\Phi}(x) = \int_D \Phi(x') G(x, x') dx' \quad (2.18)$$

Burada D akışkan uzayı (domain) olup G filtre fonksiyonudur. ϕ gibi bir büyüklüğün çözümlenmemiş (filtrelenmemiş) kısmı

$$\Phi' = \Phi - \bar{\Phi} \quad (2.19)$$

olarak ifade edilebilir. Burada filtrelenmiş salınımların değerinin sıfır olmayacağı bilinmelidir.

$$\overline{\Phi'} = 0 \quad (2.20)$$

Hesaplama uzayının küçük kontrol hacimlerine bölünerek ayrıklaştırılması doğrudan (implicit) filtreleme işlemini sağlar. V kontrol hacmi olmak üzere

$$\overline{\Phi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \Phi(x') dx' \quad ; \quad (x' \in V) \quad (2.21)$$

filtreleme işlemidir. Filtre fonksiyonu

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V & , (x' \in V) \\ 0 & , (x' \notin V) \end{cases} \quad (2.22)$$

olarak yazılır. Navier-Stokes denklemlerinin filtrelenmesi ekstra bilinmeyen büyüklüklerin türemesine yol açar. Filtrelenmiş sıkıştırılamaz RANS formülasyonu:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.23)$$

olarak ifade bulur. Buradaki τ_{ij} öncekinden farklı olarak sayısal ağ altı ölçekte (SGS: Sub-grid Scale) gerilmedir. Küçük ölçekli eddy hareketlerin etkilerini içerir (ANSYS Inc., 2009).

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2.24)$$

Büyük ölçekli çalkantılı akış, küçük ölçekli olayların etkisi de hesaba katılarak uygun SGS modeller kullanılarak doğrudan çözülmektedir. Bu tezin konusu olan sayısal çözümlerin yapılmasında kullanılan benzetim yazılımında bir sanal (eddy) viskozite yaklaşımı kullanılmakta olup SGS gerilimleri büyük ölçekli gerinim tansörüne

$$-\left(\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} \right) = \nu_{SGS} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.25)$$

denklemleri aracılığıyla ilişkilendirmektedir. δ_{ij} Kronecker Delta fonksiyonudur. Yukarıdaki ν_{SGS} sayısal ağ altı ölçekteki sanal (eddy) kinematik viskozitedir. k-ε modeli ve daha öncülü olan RANS denklemlerinde ν_{SGS} yerine tüm ölçeklerde geçerli olan kinematik viskozite ν kullanılmaktadır. LES modelinde ν_{SGS} sayısal ağ ölçeği altı sanal kinematik viskozite kullanılmaktadır.

2.7 DES Çalkantı Modeli

DES Modeli çözüm yazılımında (ANSYS-CFX) kullanıldığı hali itibarıyla Mikhail Kh. Strelets tarafından geliştirilmiş olan SST-DES formülasyonudur. Strelets'in DES modelinin altyapısında, çalkantılı uzunluk ölçeğinin (Turbulent Length Scale) sayısal ağ eleman kenar uzunluğundan daha büyük olmasının beklendiği durumlarda SST-RANS Modelinden LES Modeline geçiş yapılması vardır. İfade edilen çalkantılı kinetik enerji denkleminin hesaplamasında kullanılan uzunluk ölçeği (eşitliğin sol tarafında kalan diverjans terimleri) için yerel sayısal ağ kenar uzunluğu değeri kullanılarak bir düzenleme yapılır (SST modelinde bulunan birim çalkantılı kinetik enerji başına yıkım da düşünülerek ($\omega = \kappa/\varepsilon$; C_{DES} bir model katsayısı olarak) L_t çalkantılı uzunluk ölçeği, Δ sayısal ağ eleman kenar uzunluğu) aşağıdaki denklemler geçerlidir (ANSYS Inc., 2009).

$$\varepsilon = \beta^* \kappa \omega = \frac{\kappa^{3/2}}{L_t} \rightarrow \frac{\kappa^{3/2}}{C_{DES} \Delta} \quad (2.26)$$

$$\Delta = \max(\Delta_i) \quad (2.27)$$

$$L_t = \frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega} \quad (2.28)$$

DES modeli üç boyutlu ve tek bir çalkantı modeli kullanan kararsız bir sayısal çözüm olarak tarif edilmekte ve sayısal ağın LES modelinin uygulanabileceği kadar yüksek çözünürlüklü olduğu yerlerde bir SGS (sayısal ağ ölçeği altı) model olarak davranıp olmadığı yerlerde de bir RANS modeli gibi çalışır yada $L_{DES} = \min(L_t, C_{DES} \Delta)$ olarak ifade edilebilir (Carlsson ve diğ, 2007).

Çalkantılı kinetik enerjinin yıkım denkleminde ve DES modelinde Strelets'in yaptığı değişiklik yıkım değerine bir katsayı eklemektir. Bu katsayı bir sınırlayıcı (limiter) olarak işlev görmektedir. C_{DES} sayısının kullanım değeri 0,61 'dir.

$$\varepsilon = \beta^* \kappa \omega \rightarrow \beta^* \kappa \omega \left[\max\left(\frac{L_t}{C_{DES} \Delta}, 1\right) \right] \quad (2.29)$$

3. IŞINIM MODELİ

Işınım modellemesinin temelinde Işınım Yayılım Denklemini çözmek bulunur. Çalkantılı Enerji denkleminde bulunan kaynak terimine ısı ışıınımdan gelecek katkının hesaplanması gereklidir. Bunun dışında akışkan-katı etkileşimli (FSI) bir hesaplama yapılırken katıdan akışkana aktarılan ışıınımsal ısı transferinin hesaplanması da bu denkleme bağlıdır.

3.1 Işınım Yayılım Denklemleri ve Karacisim Işımasının Kullanımı

Uzaysal ışıını yayılım denkleminin ifadesi

$$\frac{dI_f(\vec{r}, \vec{s})}{d|\vec{s}|} = \frac{dI_f(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -(K_{af} + K_{sf})I_f(\vec{r}, \vec{s}) + K_{af}I_b(f, T) + \frac{K_{sf}}{4\pi} \int_{4\pi} dI_f(\vec{r}, \vec{s}^\circ) \Gamma(\vec{s}, \vec{s}^\circ) d\Omega^\circ + S_R \quad (3.1)$$

şeklindedir. Buradaki Γ saçılma içi faz fonksiyonu olarak tanımlanır. K_{sf} frekansa bağlı saçılma katsayısıdır. I_b karacisim ışımasından kaynaklı frekansa bağlı enerji yoğunluğudur. Işınım taşınım denklemleri I_f için s uzamında birinci mertebe bir integro-diferansiyel denklemdir. Işınım yayılım denklemleri S_R ışıını kaynaklı enerji kaynak teriminin bulunmasına yönelik olarak çözülür. Denklemlerdeki Ω parametresi de katı açıdır (ANSYS Inc., 2009).

K_{af} soğurma katsayısı, E_{bf} ise frekansa bağlı karacisim ışıması ısı akısıdır.

$$G_f = \int I_f d\Omega \quad (3.2)$$

frekansa bağlı alınan/gelen ışıını ısı akısıdır. Yalnızca ışıının olup soğurmanın olmadığı durumda $K_{af} = 0$ olur.

3.2 Karacisim Işıması

Bir karacisim tarafından salınan ışıının enerji tayfi yoğunluk dağılımı (birim zamanda birim alandan yayımlanan enerji) n ortamın kırılma indisi, h Planck Sabiti, c ışığın boşluktaki hızı ve k_B Boltzmann sabiti olarak değişken dönüşümüyle ($\eta = hf/k_B T$)

$$E_b(\eta, T) = n^2 \sigma T^4 \left(\frac{h}{k_B T} \right) \left(\frac{15}{\pi^4} \frac{\eta^3}{e^\eta - 1} \right) \quad (3.3)$$

formunda ifade edilir. Burada σ Stefan-Boltzmann sabitidir ve ifadesi

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} \quad (3.4)$$

şeklindedir. Tüm tayf üzerinden karacisim ışıma enerji yoğunluğu dağılımının tümlevi alınır (integre edilirse) yalnızca sıcaklığa bağlı toplam karacisim ışıması denklemini aşağıdaki gibi yazılır.

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_b(\eta, T) d\eta = n^2 \sigma T^4 \quad (3.5)$$

Karacisim ışıması sıcaklığın dördüncü üssüyle doğru orantılı olup hesaplamalarda sıcaklık bazen çok önemsiz derecede az ışıımsal öneme sahipken bazen de tüm olaydaki en baskın unsur olabilmektedir (ANSYS Inc., 2009).

3.3 P1 Işınım Modeli

Işınım yayılım denkleminde diferansiyel yaklaşım yada P1 Modeli olarak da bilinen bu model ışıının enerji yoğunluğunun yönelimden bağımsız (izotropik) olduğunu kabul eder. Yayılım halinde ışıının, soğurma ve doğrusal saçılma yapan özellikte bir ortam için frekansa bağlı ışıımsal ısı akısı

$$\hat{q} \cdot \vec{q}_{rf} = - \frac{1}{3(K_{af} - K_{sf}) - A_L K_{sf}} \vec{\nabla} G_f \quad (3.6)$$

olarak yazılır ve ışıının yayılım denkleminde yerine konmasıyla A_L doğrusal anizotropi katsayısı (izotropik davranıştan sapmanın bir ölçüsü) olmak üzere frekansa bağlı ve gelen/alınan ışıının denklemi yazılmış olur (ANSYS Inc., 2009).

$$-\vec{\nabla} \left(\frac{1}{3(K_{af} - K_{sf}) - A_L K_{sf}} \vec{\nabla} G_f \right) = K_{af} (E_{bf} - G_f) \quad (3.7)$$

Böylece enerji denklemi için ışımsal kaynak terimi bileşeni hesaplanabilir bir diferansiyel denklem yapıya kavuşur.

3.3.1 Duvar yakını davranışı

Bir duvara gelen yada duvardan çıkan ışımsal enerji yoğunluğunun yönelimden bağımsız olduğu varsayılır ve duvarlarda yazılan sınır koşulu

$$\hat{n} \cdot \hat{q} \cdot \dot{q}_{rf} = - \frac{1}{3(K_{af} - K_{sf}) - A_L K_{sf}} \frac{\partial G_f}{\partial n^+} = \frac{\varepsilon_f}{2(2 - \varepsilon_f)} (E_{bf} - G_f)_{duvar} \quad (3.8)$$

şeklindedir. $\vec{n}$ duvardan dışarı yönlü normal birim vektör, n^+ ise aynı doğrultuda uzaklık değeridir (ANSYS Inc., 2009).

3.4 Gri Gaz Varsayımı

Gri gaz varsayımına göre tüm ışımla ilgili büyüklükler ışımsal tayfindan neredeyse bağımsızdır. Diğer bir deyişle ışımsal güç yoğunluğu tüm frekanslar için aynıdır. Işımsal yayılım denklemi böylece frekanstan bağımsız hale gelir (frekansa bağlı terimler frekanstan bağımsız hale gelirler).

4. SAYISAL BENZETİM STRATEJİSİ

4.1 Akış Probleminin Çözümü İçin Kullanılan HAD Yazılımı ve Çözüm Stratejisi

Farklı benzetimler ANSYS-CFX yazılımında gerçekleştirilmiştir. ANSYS-CFX (CFX), ANSYS Inc. firması tarafından geliştirilmiş olan bir HAD kodu olup öncülü kimya endüstrisinde kendini kanıtlamış olan Flow3D yazılımı ve turbomakine çözümleri için Waterloo Üniversitesi tarafından geliştirilmiş olan CFX-TASCflow yazılımlarıdır. CFX akış denklemlerini tek sistem olarak çözen bir “akuple çözücüdür (coupled solver)”. Basınç düzeltmesi (basınç-hız ilişkilendirmesi) için SIMPLE algoritmasını kullanır ve sayısal çözüm şeması bakımından birinci mertebeden ileri fark şeması, iki ve daha yüksek mertebeli fark şeması yada bu şemaların etkilerinin birlikte ortaya çıktığı “tanımlanmış karıştırma faktörü (specified blend factor)” özelliğinin kullanımını mümkün kılmaktadır (Wikipedia - The Free Encyclopedia, 2013). CFX akuple denklem sistemini çözerken sonlu hacimler (FV) yöntemini kullanmaktadır.

4.1.1 Taşınım ve yayılım

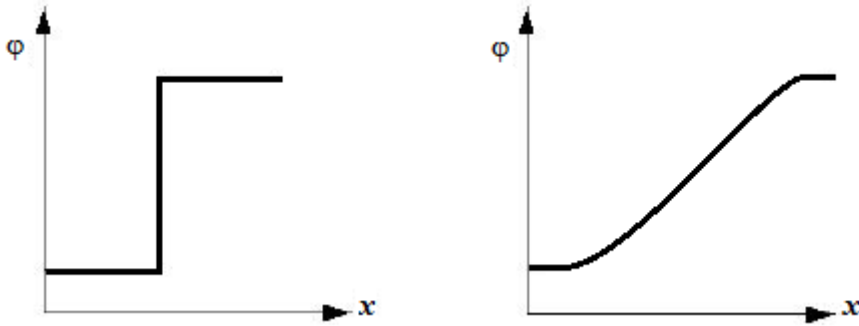
Ayrıklaştırılmış sayısal ağıın bir elemanına ait bir yüzdeki integrasyon noktasının (in) değeri, ileri (up: upwind) düğümünün değeri ve sözkonusu değerin bu iki düğüm arasında oluşacak gradyen cinsinden ifadesi

$$\varphi_{in} = \varphi_{up} + \beta \vec{\nabla} \cdot \Delta \vec{r} \quad (4.1)$$

şeklindedir. Burada β rahatlama (relaksasyon) parametresidir (relaxation factor). $\beta < 1$ için relaksasyon-altı (underrelaxation), $\beta = 1$ için relaksasyonun olmadığı hal ve $\beta > 1$ için ise relaksasyon-üstü (overrelaxation) denilmektedir. $\vec{r}$ sıradaki düğümünden integrasyon noktasına yönelimli konum vektörüdür. φ vektörünün integrasyon noktasındaki değerini hesaplamak için gereken $\text{div} \varphi$ ise aşağıda anlatıldığı gibi bulunur.

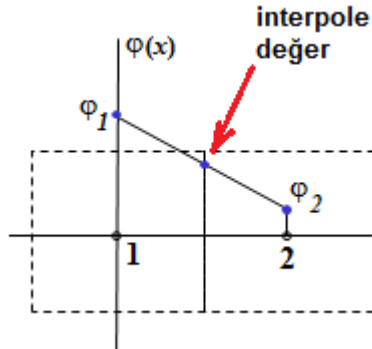
4.1.2 Yüksek mertebeli fark şeması

ANSYS-CFX $\beta = 0$, $0 < \beta < 1$ ve $\beta = 1$ değerlerinin kullanımına izin vermektedir. $\beta = 0$ ile birinci mertebeden ileri yönlü fark şeması, $0 < \beta < 1$ için tanımlanmış karıştırma faktörü (birinci mertebe ileri yönlü fark şeması ile merkezi fark şemasının karışımı), $\beta = 1$ için merkezi fark şeması kullanımı sözkonusudur. Birinci mertebeden ileri yönlü fark şeması ($\beta = 0$) için integrasyon noktası (düğüm) ve sıradaki düğüm değerinin tahmin edilen değeri arasında geçiş yumuşak ama daha geçtir.



Şekil 4.1: Birinci mertebeden ileri yönlü fark şemasında bilginin yayılımı, ANSYS Inc. (2009)'dan uyarlanmıştır.

Merkezi fark şeması $\beta = 1$ değeri anlamına gelir ve $\text{div}\phi$ değeri yerel sayısal ağ elemanı değerine eşit kabul edilerek hesaplamada kullanılır.



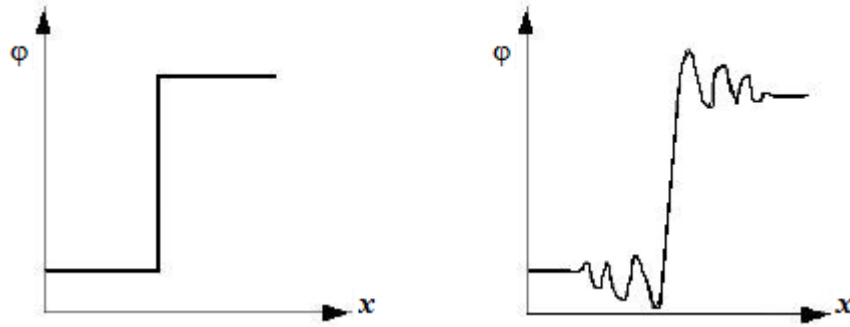
Şekil 4.2: Merkezi fark şemasında bilginin interpolasyonu, Bakker (2008)'den uyarlanmıştır.

Merkezi fark şeması uygulanırken doğrusal interpolasyon olabileceği gibi CFX üçlü-doğrusal (tri-linear) interpolasyon da yapabilmektedir. Bu interpolasyon a, b ve c genelleştirilmiş koordinatlar olmak üzere

$$\phi_{in} = \sum_n N_n(a_{in}, b_{in}, c_{in}) \phi_n \quad (4.2)$$

şeklinde N gibi bir şekil fonksiyonuyla icra edilir. Bu interpolasyon ikinci mertebeden bir hassasiyete sahip olup tanımlanmış karıştırma faktörü şemasının yayılımsal (dispersive) özelliklerine haizdir. Bu şema LES tabanlı modellerle kullanımı tavsiye edilen bir şemadır. Tanımlanmış karıştırma faktörü kullanımında ise ($\beta = 1$) ikinci mertebeden hassasiyete sahip bir fark şemasıdır ki bu durumda iki düğüm arasında daha dik gradyenlerin kullanılabilirliğine izin verir (ANSYS Inc., 2009).

İlkel (primitif) değişkenlerin gradyenlerinin daha dik hesaplanabilirliği birinci mertebeden olan ileri fark şemasından çok daha hızlı çözüm anlamına gelmesine rağmen bu diklik yayılımsal hatalara (dispersion error) açıktır ve hızlı çözüm istenen yerlerde fiziksel olmayan salınımların doğmasına neden olur.



Şekil 4.3: Tanımlanmış karıştırma faktörü kullanımında bilginin yayılımsal yapısı, ANSYS Inc. (2009)’dan uyarlanmıştır.

Bunların haricinde CFX’de “yüksek mertebeli fark şeması” olarak da geçen fark şeması β için her düğümde değeri mümkün olduğunca 1’e yakın olacak şekilde doğrusal olmayan bir hesaplama yöntemi kullanımıyla yerel rahatlatma ayarlaması yapabilmektedir. β , 1’e yaklaştıkça çözümün yakınsama hızı artmakta ancak kararsızlık olasılığı da beraberinde gelmektedir. Çözümlerde yüksek mertebeli fark şeması kullanılmıştır. Yüksek mertebeli fark şemasında β ’nın 1 değerini geçmesine izin verilmez (ANSYS Inc., 2009).

4.1.3 Basınç-hız ilişkisi ve SIMPLE algoritması

CFX’de tüm fiziksel gözlenebilirlerin aynı düğümde depolandığı eş-konumlu (co-located) sayısal ağ kullanımı söz konusudur. Eş-konumlu bilgi saklanması işlemi hesaplanan basınç alanında damalı (kesikli) bir görünüm ortaya çıkmasına neden olur (ANSYS Inc., 2009).

Eş-konumlu olmayan sayısal ağlarda hesaplanan değerler özel önlemler alınmadıkça yanlış basınç alanı (damalı görünüm) oluşumuna açıktır. Bu nedenle 1980'lerin başlarında, sıkıştırılmaz akış için eş-konumlu sayısal ağların kullanımı yaygın olmamıştır. 1983'ten sonra Rhie-Chow Algoritması ile eş-konumlu sayısal ağ kullanımı yaygınlaşmış ve önerdikleri momentum interpolasyon metodu damalı basınç alanı oluşumu problemini ortadan kaldırmıştır (Sezai, 2011).

CFX 'de kullanılışı itibariyle hız düzeltmesi için, integrasyon noktasına komşu olan düğümlerden elde edilen interpolate ortalama hız değerine (beklenen değer) eklenirse düzeltilmiş doğru hız değeri hesaplanır.

$$u_{j,in} = \bar{u}_{j,in} + h_{ip} \left(\left. \frac{\partial p}{\partial x_j} \right|_{in} - \overline{\left. \frac{\partial p}{\partial x_j} \right|_{in}} \right) - c_{ip} h_{ip} (u_{j,in}^o - \bar{u}_{j,in}^o) \quad (4.3)$$

h_{ip} için

$$h_{ip} = \frac{d_{ip}}{1 - c_{ip} d_{ip}} \quad (4.4)$$

ifadesi, d_{ip} için $d_{ip} = -V_k/A_s$ ve $c_{ip} = \rho/\delta t$ ifadeleri geçerlidir. V_k kontrol hacmi değeri, ρ akışkan yoğunluğu, δt zaman adımı ve A_s ise bir yaklaşıklık sayısıdır (ANSYS Inc., 2009).

4.1.4 Zamana bağlı terimler ve ikinci mertebe geri yönlü Euler şeması

Zamana bağlı olarak şekil değiştirmeyen kontrol hacimleri için zamanda n . zaman adımı için genel ayrıklaştırma yaklaşımı

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_k} \rho \phi dV \cong V \frac{(\rho \phi)^{n+1/2} - (\rho \phi)^{n-1/2}}{\delta t} \quad (4.5)$$

şeklinde olup zaman adımının başlangıç ve bitişindeki skaler değerleri $n+1/2$ ve $n-1/2$ üst indisleriyle gösterilmektedir. Zamanda iterasyon için birinci mertebe geri yönlü Euler (First Order Backward Euler Scheme) şeması için zaman adımının başlangıç ve bitiş değerleri bir önceki ve içinde bulunulan zaman adımındaki değerler kullanılarak kestirilir ve

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_k} \rho \phi dV = V \left(\frac{\rho \phi - \rho^o \phi^o}{\delta t} \right) \quad (4.6)$$

ayrıklaştırılmış toplam değer zamana bağlı türevi olur. İkinci mertebe geri yönlü Euler şeması için zaman adımının başlangıç ve bitişindeki değerlerin kestirimi

$$(\rho\varphi)^{n-1/2} = (\rho\varphi)^o + \frac{1}{2}((\rho\varphi)^o - (\rho\varphi)^{oo}) \quad (4.7)$$

$$(\rho\varphi)^{n+1/2} = (\rho\varphi) + \frac{1}{2}((\rho\varphi) - (\rho\varphi)^o) \quad (4.8)$$

şeklinde icra edilir. ^o ve ^{oo} üst indisleri sırasıyla içinde bulunulan zaman adımından bir önceki zaman adımı ve içinde bulunulan zaman adımından iki önceki zaman adımı manasında kullanılmaktadır. Bu bağıntılar Denklem 4.5'te kullanılırsa sonuç ayrıklaştırma şekli

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_k} \rho\varphi dV \cong V \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2}(\rho\varphi) - 2(\rho\varphi)^o + \frac{1}{2}(\rho\varphi)^{oo} \right) \quad (4.9)$$

biçiminde olur. Bu ayrıklaştırma açık (implisit) ve zamanda korunumlu yapıya sahip olup zaman adımına büyüklük sınırlaması getirmemektedir. Zamanda ikinci mertebe ve daha yüksek hassaslığa/doğruluğa sahiptir ancak bazı fiziksel olmayan çözüm salınımları doğurma riskini barındırmaktadır (ANSYS Inc., 2009).

4.1.5 Akuple denklem sistemleri

İleride anlatılan sonlu hacimler yönteminin ayrıklaştırılmış hesaplama uzayının tüm elemanlarına uygulanışı ile ayrıklaştırılmış korunum denklemleri oluşur. Denklem sistemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum_{ko(i)} a_i^{ko} \varphi_i^{ko} = b_i \quad \text{yada} \quad [A][\varphi] = [b] \quad (4.10)$$

Bu oluşturulan doğrusal dönüşüm formudur. Burada $[\varphi]$ çözüm, $[b]$ sağ taraf vektörü ve $[A]$ ise denklem katsayılarının oluşturduğu katsayılar matrisidir. i sözkonusu bulunan kontrol hacmi (elaman) sayısını yada düğüm sıra sayısını ifade etmektedir. “ko” üst indisi “komşu” manasında olup aynı zamanda i . konumda bulunan değer ile çarpılan merkezi katsayıyı da içermektedir. Herhangi bir düğümün herhangi bir sayıda benzer komşusu bulunabilir ve bu yöntem hem yapılandırılmış hemde yapılandırılmamış (UM) sayısal ağlara uygulanabilir. Tüm kontrol hacimleri için yazılan tüm denklemler bu doğrusal denklem sistemini oluşturmaktadır. Skaler bir değer için a_i^{ko} , φ_i^{ko} ve b_i ‘de birer skalerdirler. Akuple üç boyutlu kütle ve momentum

denklemleri için bu matris kümesi (5x5) bir matris ve (5x1) bir vektördür (ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2009).

$$a_i^{ko} = \begin{bmatrix} a_{uu} & a_{uv} & a_{uw} & a_{up} & a_{ue} \\ a_{vu} & a_{vv} & a_{vw} & a_{vp} & a_{ve} \\ a_{wu} & a_{wv} & a_{ww} & a_{wp} & a_{we} \\ a_{pu} & a_{pv} & a_{pw} & a_{pp} & a_{pe} \\ a_{eu} & a_{ev} & a_{ew} & a_{ep} & a_{ee} \end{bmatrix}_i^{ko} \quad (4.11)$$

ve

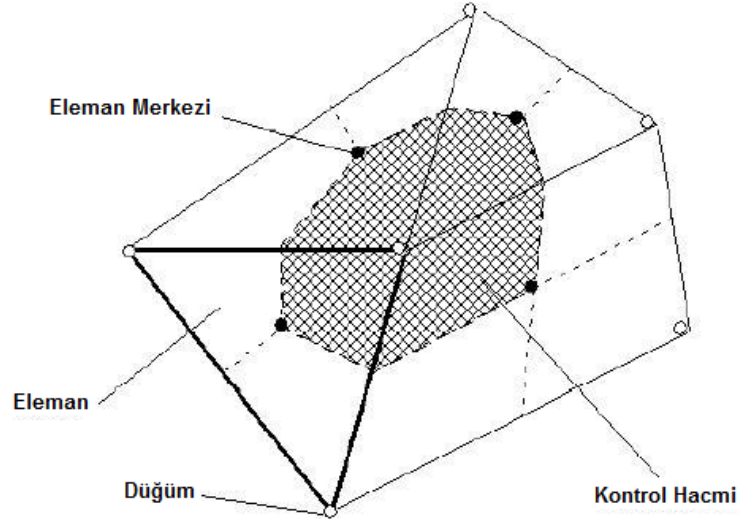
$$\phi_i^{ko} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ e \end{bmatrix}_i^{ko} \quad (4.12)$$

$$b_i^{ko} = \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \\ b_e \end{bmatrix}_i \quad (4.13)$$

olarak ifade edilirler.

4.1.6 Çözülen denklemlerin sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılması

CFX’de sayısal çözüm yöntemi olarak eleman tabanlı sonlu hacimler yöntemi uygulanmaktadır. Bu sayısal çözüm yöntemi birçok ticari HAD yazılımının kullandığı genelgeçer bir yöntem olup bir denklem sistemi ayrıklaştırma yöntemi olarak kabaca detayları aşağıda bulunmaktadır. Örnek olarak 2 boyutlu bir sayısal ağın komşu elemanları ile oluşan bir ağ yapıda eleman merkezleri, çakışma kenar merkezleri (3 boyutta yüzey merkezleri) ve aslen düğüm noktaları (nodlar) kullanılarak yazılabilir.



Şekil 4.4: İki boyutta sayısal ağ elemanı yapısı, ANSYS Inc., (2009)'dan uyarlanmıştır.

Yukarıdaki şekil sayısal ağın herhangi bir elemanı ve onun içinde oluşturulan ve eleman yüzeylerinin merkez noktalarını birleştirerek oluşturulan kontrol hacmini örnek teşkil etmesi bakımından iki boyutlu olarak göstermektedir. Sonlu elemanlar yöntemini ifade etmek için kartezyen koordinatlarda kütle, momentum ve taşınım tabi bir edilgen skaler ele alınırsa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_k \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right] + S_\phi \quad (4.16)$$

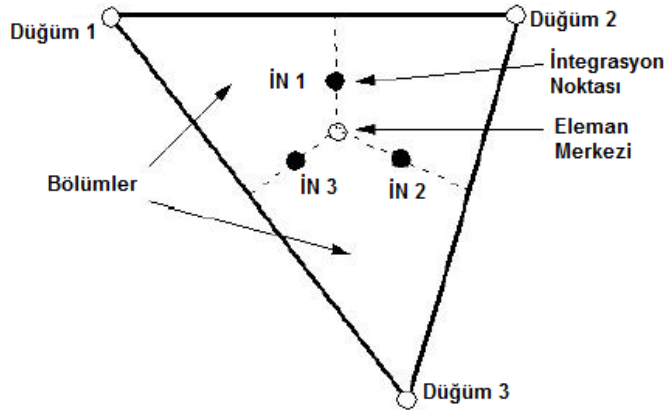
Gauss diverjans teoreminin de katkısıyla bu denklemler her kontrol hacminde integre edilir. Sayısal ağ elemanları zamanla şekil değiştirmiyorsa zaman türevleri içeren terimler hacim integrallerinin dışına çıkarılabilir ve integre edilmiş denklemler

$$\frac{d}{dt} \int_{V_k} \rho dV + \int_Y \rho u_j ds_j = 0 \quad (4.17)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_k} \rho u_j dV + \int_Y \rho u_i u_j ds_i = - \int_Y p ds_i + \int_Y (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) ds_i + \int_{V_k} S_{M(j)} dV \quad (4.18)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_k} \rho \phi dV + \int_Y \rho u_j \phi ds_j = \int_Y D_k \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) ds_j + \int_{V_k} S_\phi dV \quad (4.19)$$

şeklinde yazılır. V_k ve Y harfleri sırayla hacim ve yüzey integrallerini ve dn_j ise dışarı yönlü yüzey alan vektörünün diferansiyel kartezyen bileşenlerini ifade etmektedir. Hacim integralleri kaynak terimleri, yüzey integrali de akıların toplamını ihtiva eder. Sonlu hacimler yönteminin sıradaki adımı hacim ve yüzey integrallerinin ayrıklaştırılması olup bu işlem için aşağıdaki gibi bir tekil sayısal ağ elemanı ele alalım.



Şekil 4.5: İntegrasyon noktaları ve bir sayısal ağ elemanı, ANSYS Inc., (2009)'dan uyarlanmıştır.

Ayrıklaştırma sonrasında denklemler aşağıdaki gibi yazılır

$$V_k \left(\frac{\rho - \rho^o}{\delta t} \right) + \sum_{in} \dot{m}_{in} = 0 \quad (4.20)$$

$$V_k \left(\frac{\rho u_j - \rho^o u_j^o}{\delta t} \right) + \sum_{in} \dot{m}_{in} (u_j)_{in} = \sum_{in} \dot{m}_{in} (p \cdot \Delta n_j)_{in} + \sum_{in} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \Delta n_i \right]_{in} + \overline{S_M} V_k \quad (4.21)$$

$$V_k \left(\frac{\rho \phi - \rho^o \phi^o}{\delta t} \right) + \sum_{in} \dot{m}_{in} \phi_{in} = \sum_{in} \left(D_k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{in} + \overline{S_\phi} V_k \quad (4.22)$$

ve integrasyon noktalarındaki değerleriyle ifade edilen kütle debisi

$$\dot{m}_{in} = (\rho u_j \Delta n_j)_{in} \quad (4.23)$$

şeklinde yüzeyden dışarı yönlü normal vektörü ve hız ile yazılabilir. Burada yazılan ayrıklaştırma birinci mertebeye geri yönlü Euler şemasıdır.

4.1.7 Sayısal çözüm algoritması

Ayrık çözümler önce momentum denklemlerini çözüp bir tahmin basınç değeri bularak bu basıncın düzeltilmesi için bir hesaplama yaparak ilerlemektedir. CFX bir akuplu çözümler olup akış denklemlerini (u, v, w, p, e) tek bir sistem (ilkel değişken) olarak çözmektedir. Çözümde gidişte herhangi bir zaman adımında tamamen kapalı bir ayrıklaştırma kullanılmaktadır. Zamandan bağımsız problemlerde zaman adımı, zamandan bağımsız çözüme bir yaklaşım parametresi gibi kullanım görür. Fiziksel anlamda bir anlam taşımamakta ve ayrıklaştırılmış denklemleri bir sonraki iterasyona taşımada işlev görmektedir. Aşağıdaki çözüm fonksiyonel diyagramı CFX’de kullanılan genel akış alanı çözüm sürecinin özetidir. Algoritmada, akış denklemlerinin çözümü her zaman adımında

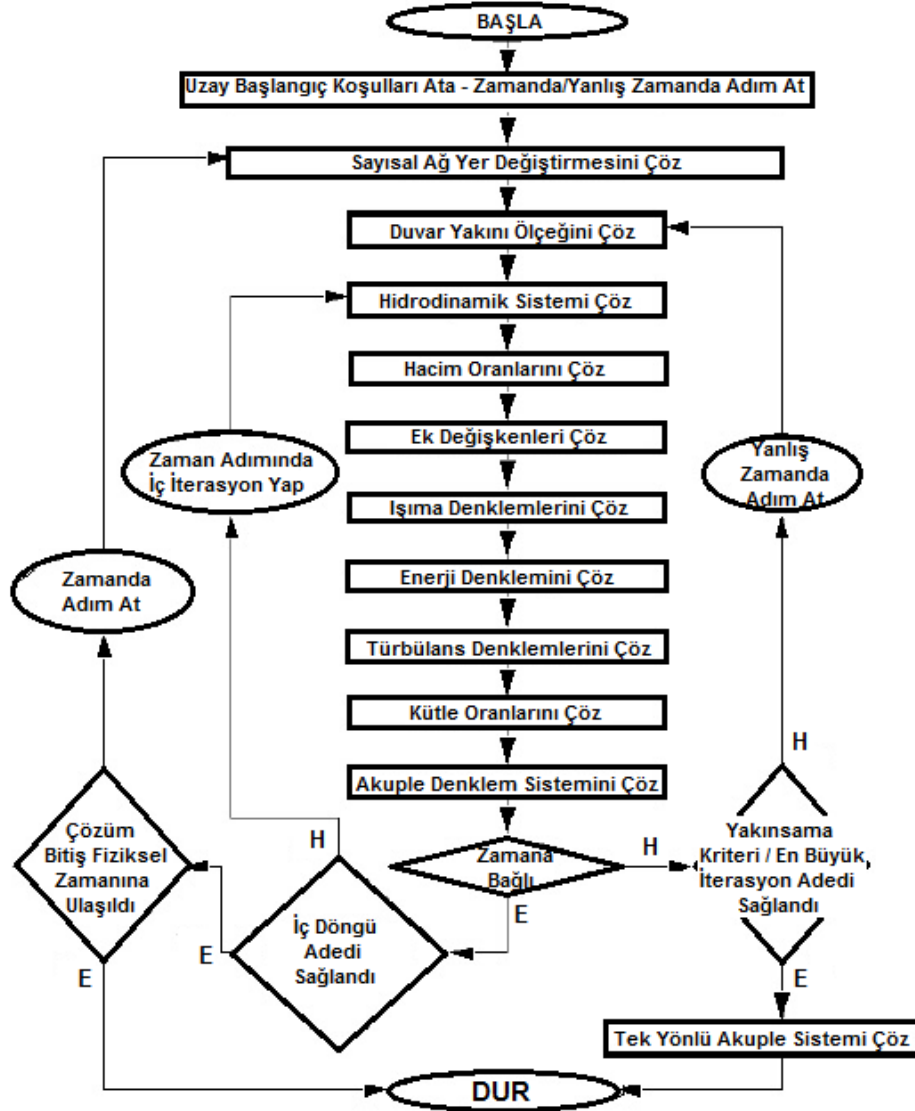
- Katsayı üretimi : Doğrusal olmayan denklemler doğrusallaştırılır ve çözüm matrisinde gerekli yerlerine konulur.
- Doğrusal denklemler AMG yöntemi kullanılarak çözülür.

CFX ‘de akış alanlarını çözerken sıradaki yada zaman adımı iterasyonu fiziksel zaman ölçeği ile kontrol edilebildiği gibi aynı zamanda da zamandan bağımsız yada zamana bağlı haller için de zaman adımı ile kontrol edilebilmektedir. Yangın dumanı ve analizi için zamana bağlı bir akış çözümü yaptığımız için her zaman adımı kendi içerisinde birçok iç döngü ile çalışır. Bir zaman adımından takip eden diğerine geçmenin iki koşulu vardır:

- Zaman adımı başına önceden belirlenen iç döngü adedine ulaşılması
- Yakınsama kriteri ile girilen ve her akış denkleminin bir önceki iç döngü sonucu ile kıyasla elde edilen bağıl hata miktarının tüm çözümlenen denklemler için sağlanmış olması (yakınsama kriterinin sağlanması).

CFX dahil olmak üzere birçok HAD yazılımı probleme ilişkin sayısal ağda CFL koşulunu sağlayabilmek adına zamana bağlı olmayan problemlerde, zamana bağlı terimlerin problem zamandan bağımsız olarak düşünülse de hesaba katılarak zamandan bağımsızlaştığı uygun bir çözüme ulaştırılmasıyla çözüme gitmektedir. CFL koşulunun sağlanabilmesi için zaman adımını sayısal ağın sıklık mertebesine

göre ayarlayarak uygun bir zaman adımı atarak ilerlemeye dayalı “Psödo” yada “Yanlış” olarak da anılan “Yanlış Zamanda Adım Atma Tekniği” şemasıyla iterasyonlara devam edebilmektedir. Aşağıdaki fonksiyonel diyagramda bulunan yanlış zamanda adım atma ifadeleri bu yöntemle ilgilidir.



Şekil 4.6: CFX benzetim yazılımının akış alanını hesaplamada kullandığı çözüm algoritması, ANSYS Inc., (2009)’dan uyarlanmıştır.

4.1.8 MG-ILU ile doğrusallaştırılmış denklemlerin çözümü

Kullanılan CFX yazılımında ayrıklaştırılmış ve doğrusallaştırılmış akış denklemlerin çözümü için Multigrid - Hızlandırılmış ILU ayrıklaştırılması kullanılmaktadır. Daha önce de yazıldığı gibi $[A][\phi]=[b]$ denkleminde $[A]$ katsayılar matrisi, $[\phi]$ çözüm vektörü ve $[b]$ ise sağ taraf vektörü olarak isimlendirilmektedir. Bu denklem iteratif

olarak çözülür. Öncelikle $[\varphi]^n$ gibi bir yaklaşık (tahmini) çözümle başlanıp $[\tilde{\varphi}]$ şeklinde bir düzeltmeyle geliştirilir ve sonuçta $[\varphi]^{n+1}$ isimli bir değere ulaşılır.

$$[\varphi]^{i+1} = [\varphi]^i + [\tilde{\varphi}] \quad (4.24)$$

$[\tilde{\varphi}]$ düzeltmesi

$$[A][\tilde{\varphi}] = [r]^i \quad (4.25)$$

denkleminin çözümüdür. i. artık (rezidü) – ki elde bulunan çözüm ile elde edilen sağ taraf vektörü ile yeni sol taraf vektörü elemanları arasındaki farka eşit olarak – hesaplanır:

$$[r]^i = [b] - [A][\varphi]^i \quad (4.26)$$

Bu işlemin sürekli tekrarı istenilen yakınsama koşulunu sağlayacak mertebede hassas bir sonuç verene kadar yapılırsa kabul edilebilir doğrulukta çözüm $[\varphi]$ elde edilir (ANSYS Inc., 2009).

$[A][\varphi] = [b]$ denklemini yüksek çözünürlüklü “ince” bir sayısal ağda çözersek düzeltme değeri $[\tilde{\varphi}]$ küçük ölçekte salınımlar gösterir ve törpülenmesi zor olmaktadır. Eğer daha “kaba” bir sayısal ağ üzerinde bu çözümü yaparsak daha verimli biçimde düzeltme değeri doğru hesaplanabilir ve bir sonraki ilk tahmin daha doğru kestirilebilir. Böylece daha kaba bir ağa geçerek ilk düzeltme değeri tahmini $[\tilde{\varphi}] = 0$ ilk tahminiyle $[A][\tilde{\varphi}] = [r]$ çözülür.

- $[A][\varphi]^i = [b]$ ince ağda $[\varphi]^{i+1}$ tahminini elde etmek için çözülür.
- $[r] = [b] - [A][\varphi]^{i+1}$ hesaplanır.
- $[e] = [\varphi]^i - [\varphi]^{i+1}$ hata olmak üzere $[A][e] = [r]$ çözülerek bir seviye daha kaba bir sayısal ağ için hata değerine bir yaklaşıklık $[e]^{(2)}$ yapılır.
- Yaklaşıklık düzeltilir $[\varphi]^{i+1} = [\varphi]^{i+1} + [e]^{(2)}$

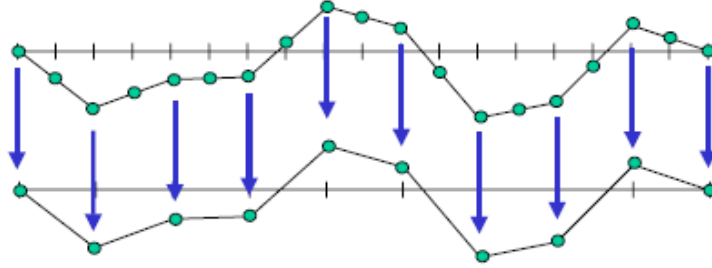
Bu işlemlerde kaba sayısal ağa geçiş ve kaba sayısal ağdan tekrar ince sayısal ağa geri dönüş için tekniklere ihtiyaç vardır. İnce ağdan kaba ağa görüntüleme (mapping)

$$[I]_h^{2h} : \Lambda^h \rightarrow \Lambda^{2h} \quad (4.27)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada çözüm vektörünün ince ağdaki değeri $[\varphi]^{i+1}$ ‘i kaba ağa sınırlayan (sıkıştıran) bir yasaklama operatörü $[I]_{(1)}^{(2)}$ sözkonusudur. Bu operatör

$$[I]_{(1)}^{(2)}[\varphi]^{(1)} = [\varphi]^{(2)} \quad (4.28)$$

şeklinde etki eder.



Şekil 4.7: İnce ağdan kaba ağa bir boyutta görüntüleme ile birinci mertebeden aktarım, Briggs'den uyarlanmıştır.

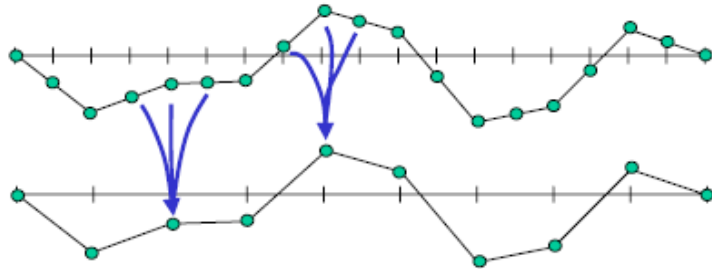
Burada gerçekleştirilen çözüm vektörünün kaba ağda görüntülenmesinde (m düğüm sıra sayısı)

$$[\varphi]_m^{(2)} = [\varphi]_{2m}^{(1)} \quad (5.50)$$

İşlemi Şekil 5.8 'de de gösterilen birinci mertebe görüntülemeyi gerçekleştirir. Buna enjeksiyon da denir. Bunun haricinde tam ağırlıklandırma olarak da ifade edilen ikinci mertebe görüntüleme de yapılabilir. Şayet

$$[\varphi]_m^{(2)} = 0,25 ([\varphi]_{2m-1}^{(1)} + 2 [\varphi]_{2m}^{(1)} + [\varphi]_{2m+1}^{(1)}) \quad (5.51)$$

şeklinde uygulanarak



Şekil 4.8: İnce ağdan kaba ağa bir boyutta görüntüleme ile ikinci mertebeden aktarım, Briggs'den uyarlanmıştır.

kaba ağa geçiş yapılır. Kaba ağdan tekrar ince ağa geçiş ve algoritma detayları EKLER kısmında yer almaktadır.

4.2 HAD Benzetimlerinde Kullanılan Etken Parametreler ve İş Bilgisayarı Özellikleri

Hesaplamalarda 12 GB fiziksel bellek (RAM) ve 6 gerçek 6 sanal 2,4 GHz işlem sıklığına sahip Intel Xeon çekirdekli işlemciye sahip bir HP Z600 iş bilgisayarı kullanılmıştır.

Çizelge 4.1: Benzetimlerde kullanılan etken parametre ve özellikler.

Parametre	Kullanılan Değer
Sayısal Hesaplama Ağı	Üç boyutlu yapılandırılmamış ağ. Eleman sayısı 1533899 ve düğüm sayısı 317567. Baskın eleman tipi dörtyüzlü (tetra).
Zamana Bağlı Çözüm	Toplam fiziksel süre 540 s / $\delta t = 0,25$ s.
Yakınsama Koşulu	Bir zaman adımında en fazla iç döngü adedine (20) ulaşılması yada aynı zaman adımında süreklilik, URANS, enerji, κ , ϵ için 10^{-9} artık (hata) değerine ulaşılması.
Türbülans Modelleri	κ - ϵ , LES, DES.
Duvar Davranışı ve Sınır Tabaka / Duvar Özelliği	Standart Duvar Fonksiyonları / tavan jetine yönelik (otopark tavanında) 1,1 büyüme oranıyla 5 eleman kalınlığında ince sayısal ağ. Adyabatik duvar.
Işınım Modeli	P1.
Sınır Koşulları	Açıklık: 0 Pa, 293°K hava. Giriş/Çıkış: Yüzeye dik yönlü sabit dağılımlı (uniform) hızlardan oluşan hacimsel hava debisi.
Yangın / Yangın Gücü	Otopark geometrisinin iki farklı noktasında eşanlı olarak davranan ve doruk değeri 5MW olan yangın kaynakları. Büyüme t^2 yasasına, zayıflama $\exp[-(t-t_0)/\tau]$ yasasına bağlı.
Işınım yayımlama ve soğurma	Gri gaz varsayımı.

5. YANGIN BENZETİMİ VE SONUÇ KARŞILAŞTIRMASI

5.1 Model Geometrisi ve Ayrıklaştırılmış Sayısal Hesaplama Ağı

Benzetimlerde çalkantı modellerinin karşılaştırılması için halihazırda inşaatı İstanbul'da devam etmekte olan bir çok katlı yaşam ve alışveriş merkezinin otopark olarak görev yapacak olan bodrum katlarından biri ele alınmıştır. Söz konusu inşaatın üç adet bodrum katı bulunmaktadır ve üç kattan hem geometrisi bakımından hemde diğer katlara kıyasla çalkantı modellerinin etkisinin daha doğru anlaşılabilceği ön tartışmalarla seçilen/belirlenen üçüncü bodrum (yeryüzüne en uzak olan) kattır.

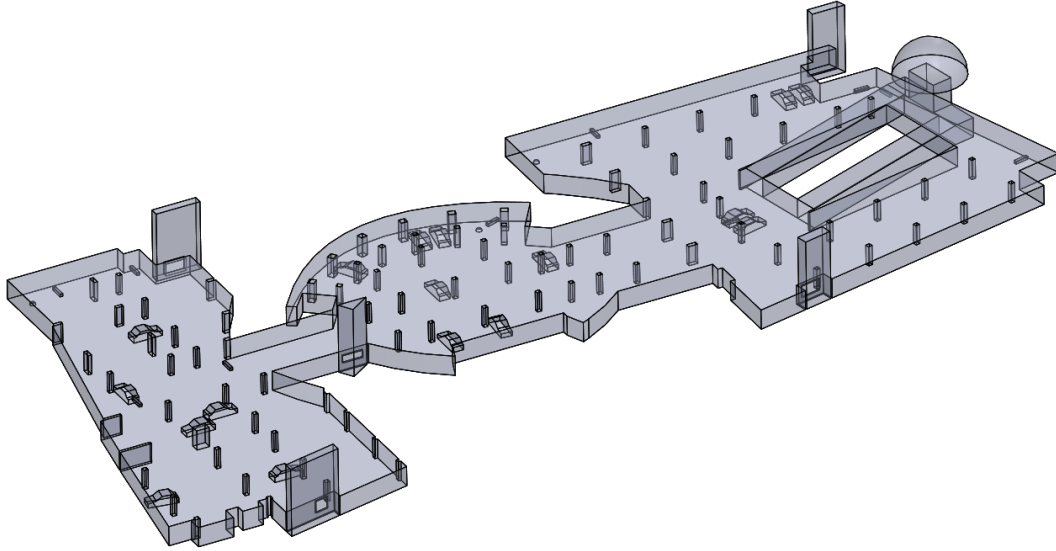


Şekil 5.1: Model geometrisinin kullanıldığı projenin üçüncü bodrum katı.

Esas hacim olarak seçilen üçüncü bodrum kat ortamının detaylı teknik resmi ekler kısmında yer almaktadır. Üçüncü bodrum katın iç (akışkan) hacmi hesaplama uzayı olarak modellenmiştir. Burada iç hacme ve ortaya çıkacak akışı etkileyecek olan hacmi düşürücü ekstra cisimlere (park halindeki araçlar) de dikkat edilmesi gereklidir.

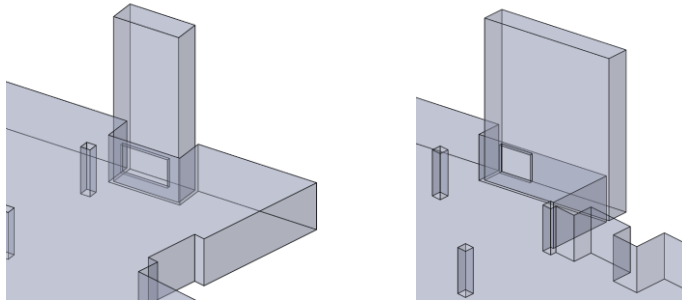
Çıkacak olası bir yangının HAD modellemesinde olabilecek en kötü durum olan tüm arabaların park halinde otoparkı doldurduğu hal de ele alınmalıdır (BS 7346-7:2006, 2006). Ancak bu kuralın dışında otoparkın tamamen boş olduğu durumun da çözülmesi gerekir ki bu tanımlamalar BS 7346-7 kodlu ve Türk Yangın Standardına da kaynaklık eden İngiliz standardında belirtilen ve mekan güvenliğinin sorgulandığı

bir durum için HAD'ye başvurulduğu halde çözüme yansıtılır. Bu çalışmanın konusunda kapalı otoparkın güvenliği değil, sözkonusu otoparkta aynı koşullar altında sadece çalkantı modeli farklılığının yarattığı etkiyi anlamak vardır. Otoparkın modellenmesinde her iki durumu da basitçe temsilen az sayıda park etmiş arabayı simgeleyen araba benzeri cisimler hesaplama uzayından çıkarılmış olarak modelleme yapılmıştır.

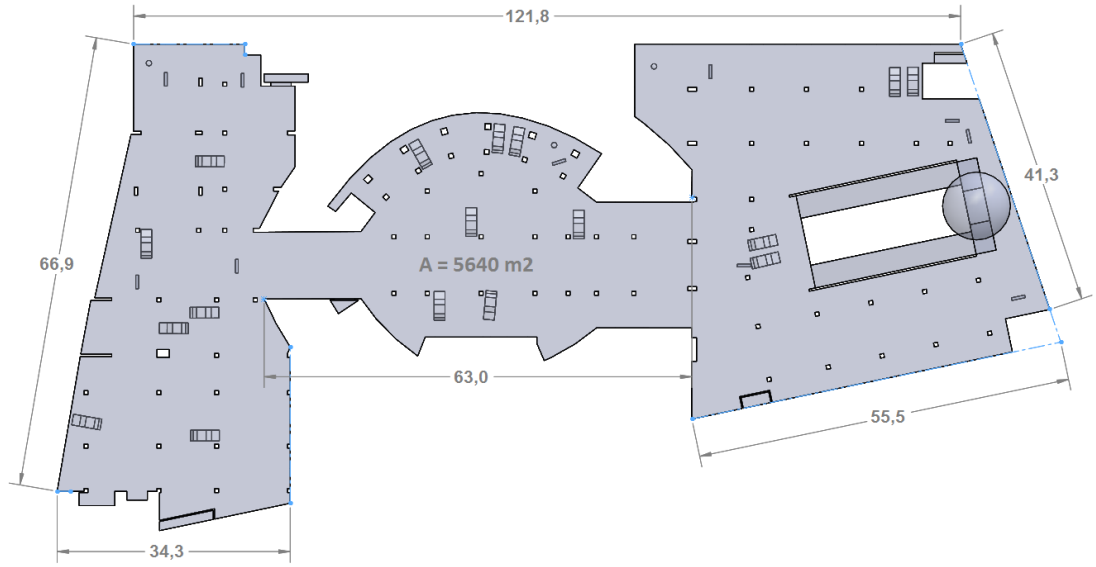


Şekil 5.2: Model geometrisi.

Model geometrisindeki kule görünümlü düşey yönlü sütunlar, otoparkın havalandırmasında kullanılan ve şaft adı verilen egzoz ve taze hava geçiş kanallarıdır. Ortama taze hava sağlanması ve oluşan yangın dumanının egzozu bu şaftlardan sağlanmaktadır.



Şekil 5.3: Yangın duman egzozu yada taze hava sağlama için kullanılan şaft örnekleri.

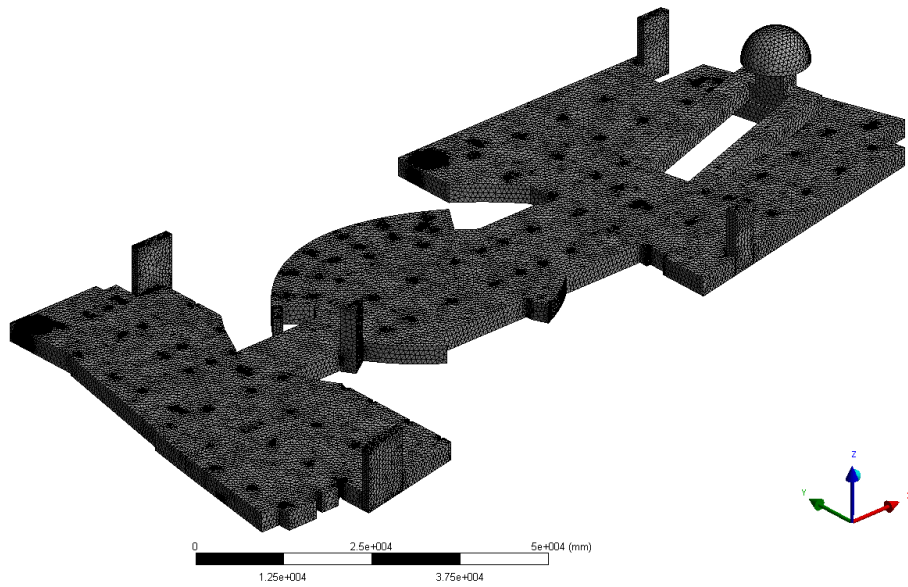


Şekil 5.4: Model geometrisinin üst görünüşte metre cinsinden boyutları ve kat alanı.



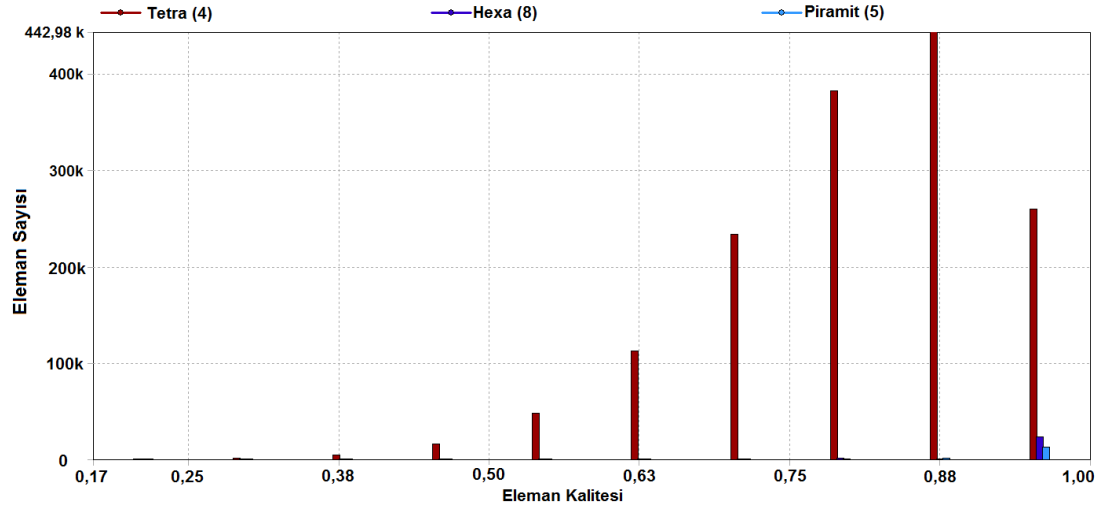
Şekil 5.5: Model geometrisinin yan görünüşte metre cinsinden boyutları ve kat yüksekliği detayı.

Yukarıdaki resimlerde belirtilen boyutlara sahip model geometrisinin içerisinde oluşacak bir yangının sayısal modellemesine yönelik olarak yapılan ayrıklaştırma yapılandırılmamış (UM) bir sayısal ağ ile elde edilmiştir. Aşağıda modelin içine oluşturulmuş sayısal ağ görülmektedir.



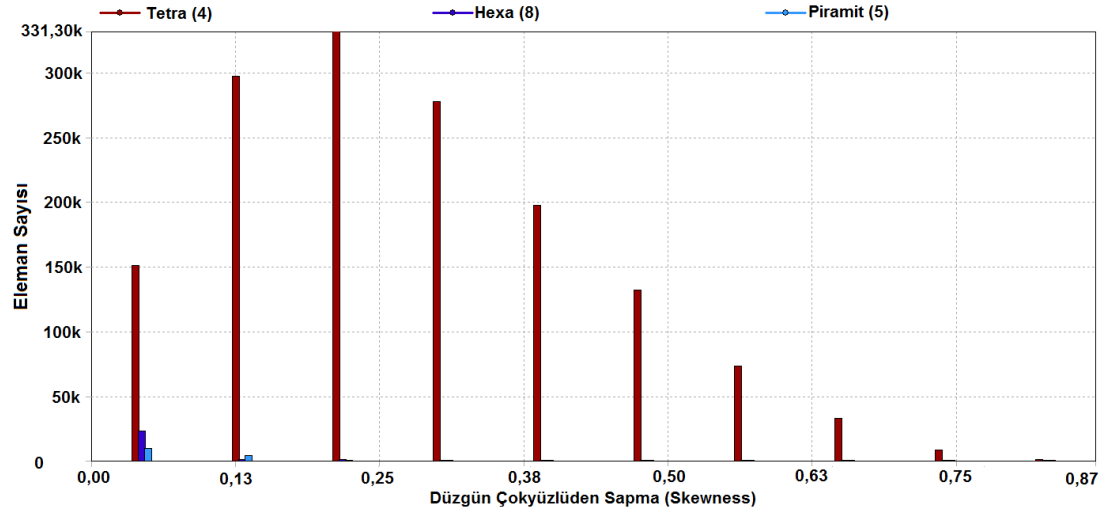
Şekil 5.6: Hesaplama uzayının sayısal ağ ile ayrıklaştırılmış halinin dolu görünümü.

Sayısal ağın kalitesi ile ilgili olarak üç değerlendirme özelliği kullanılmıştır. Her üç çalkantı modelinin kullanıldığı tekil benzetimlerde aynı sayısal ağ kullanıldığından aşağıdaki kalite göstergeleri genel özelliğe sahiptir.

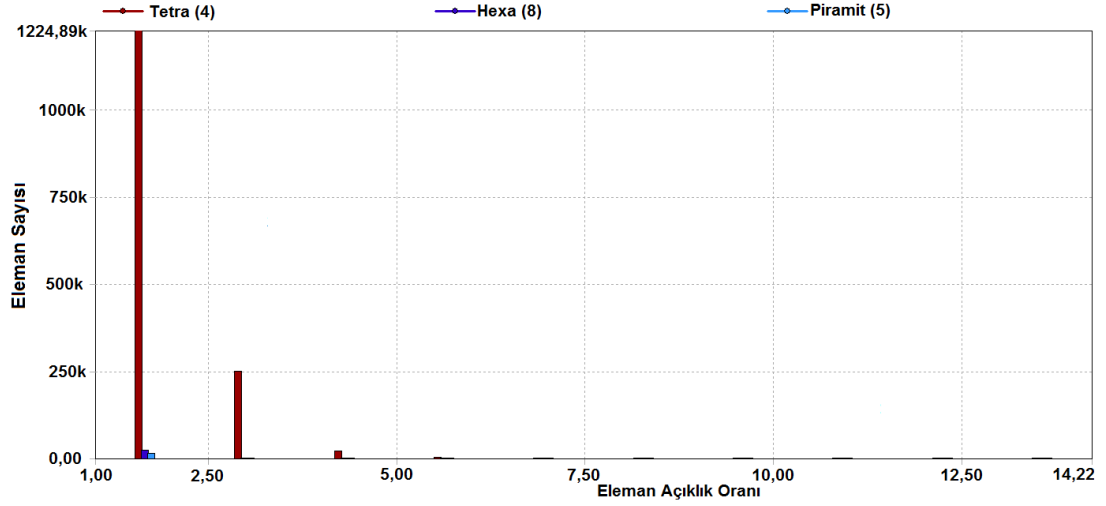


Şekil 5.7: Sayısal ağ eleman sayısının “eleman kalitesi” parametresine bağlı grafiği.

Eleman kalitesi parametresi, CFX ‘de çok sayıda sayısal ağ kalite göstergesinin ağırlıklandırılmış bir ortalaması alınarak hesaplanmakta olup, güvenilir ve toptan bir değerlendirme parametresidir.



Şekil 5.8: Sayısal ağ eleman sayısının düzgün çokyüzlüden sapma grafiği.



Şekil 5.9: Sayısal ağ eleman sayısının “eleman açıklık oranı” parametresine bağlı grafiği.

Çizelge 5.1: Sayısal ağa ait bilgiler.

Düğüm sayısı	317567
Eleman Sayısı	1533899
Parametre : Eleman Kalitesi	
Minimum	0,170445
Maksimum	0,999999
Ortalama	0,115435

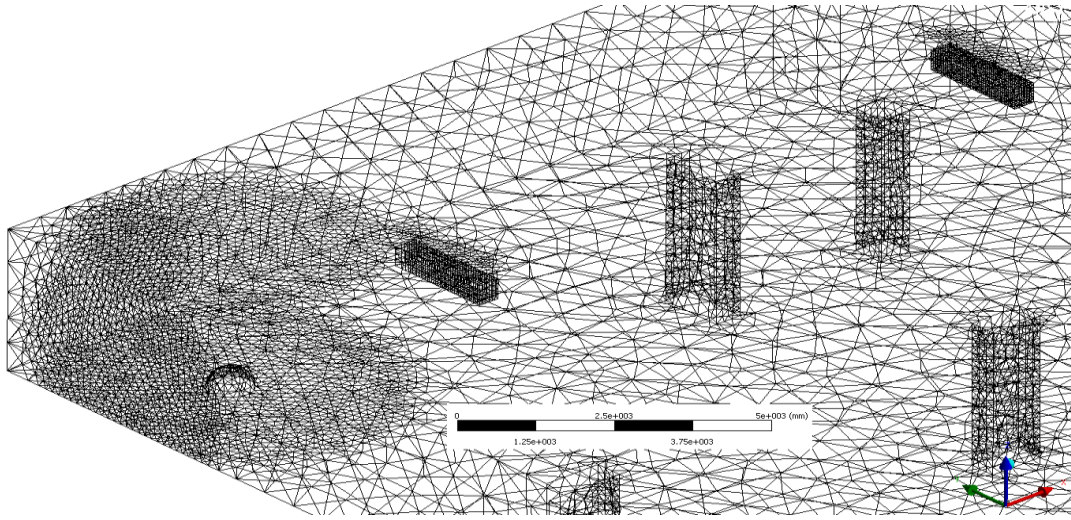
5.1.1 Sayısal ağ ile karakteristik uzunluk karşılaştırması

Çalkantı modellerinin karşılaştırılması için yapılan analizlerde kullanılan yangın konvektif ısı akısı ve ilgili anolojinin nasıl oluşturulduğu ileriki bölümlerde anlatılacak olup şimdilik bir kapalı otopark yangınında binek taşıt yanması halinin standartlarda 5 MW/m^2 ‘lik bir güç ile ısı saldıgı bilgisine dayalı biçimde tasarım yangını olarak kaynağın yüzey alanı 1 m^2 olarak seçilmiştir ve dolayısıyla $dQ/dt = 5 \text{ MW}$ olur. $\rho_\infty = 1,204 \text{ kg/m}^3$, $T_\infty = (20 + 273,15)^\circ\text{K}$, $c_p = 1,005 \text{ (kJ/kg}^0\text{K)} = 1005 \text{ (J/kg}^0\text{K)}$ ve $g = 9,83 \text{ m/s}^2$ olarak 20°C ‘de ortam sıcaklığındaki havanın özellikleridir. Karakteristik uzunluk Denklem 3.2 ile belirtilen karakteristik uzunluk ifadesi ile hesaplanırsa

$$D^* = [(5 \times 10^6) / (1,204 \times 293,15 \times 1005 \times \sqrt{9,83})]^{2/5} = 4,58 \text{ m}$$

olarak bulunur. Ayrıca yangının çıkışından sonra serbest akım yoğunluğu ve sıcaklığını hesapta kullanmak gerekirse, ortama salınan sıcak yangın dumanının sabit basınçlı bir süreçle ortaya çıktığı düşünülerek ideal gaz hal denklemi bakımından

$P_Y = \rho_{\infty Y} R_Y T_{\infty Y} \approx \rho_{\infty} R T_{\infty} = P$ yaklaşıklığıyla yangında karakteristik uzunluğun, normal haldeki karakteristik uzunlukla yaklaşık eşit olacağı kabul edilebilir. Bu nedenle hesaplama uzayına örülü sayısal ağ için yanmanın tanımlandığı yangın bölgelerinde yukarıda bulunan 4,58 m ‘lik uzunluğa yaklaşık 10 elemanın sığıp sığmadığı kontrol edilmiştir. Yangın bölgesine atılan sayısal ağda 4,58 m ‘lik bir uzunluk için en az 10 eleman koşulu sağlanmıştır.



Şekil 5.10: Yangın için karakteristik uzunluk ile sayısal ağ eleman sıklığının yangın noktasında karşılaştırılması.

5.2 Yangın Kurtarma Sistemine Yönelik HVAC Tasarım Kriterleri ve Duman Kontrol Zonları

Yangın duman egzozu ve insan kaçışına yardımcı görevle kullanılan yangın kurtarma sistemleri genel olarak, taze hava şaftları ve içine yerleştirilen endüstriyel tip taze hava fanlarını, duman egzoz şaftları ve içine yerleştirilen sıcak dumana dayanıklı duman egzoz fanlarını, ortamdan egzoz kanal tesisatı aracılığı ile yapılıyorsa kanal sistemi ve bünyesinde bulunan tüm elektro-mekanik bileşenleri, eğer egzozu yardımcı diğer bir sistem olan jetfanlı sistem kullanılıyorsa jetfanları, egzoz ve taze hava şaftlarının ortama açılan pencerelerinde bulunan duman pencerelerini, yangın alevini belli bir bölgeye hapsedmek amacıyla kullanılan yangın pencerelerini, yangın başlangıcını takiben sulama ile söndürme yapan yağmurlama sistemi ve tesisatını ve

ek olarak da tüm fanlar, pencereler ve yağmurlama sistemi bileşenlerini harekete geçiren kontrol sisteminin dahilindeki algılayıcıları (sensör), elektrik pano ve güç kablolarını ve kontrol panolarını içermektedir.

Kaynaklarda “İmpuls Havalandırma” olarak da geçen jetfanlı duman egzoz sisteminin Türk Yangın Standardına kaynaklık eden İngiliz BS7346-7 standardında belirtilmiş olan temel bazı özellikleri sağlaması zorunludur. BS7346-7:2006 standardındaki madde numaralarıyla verilecek olursa:

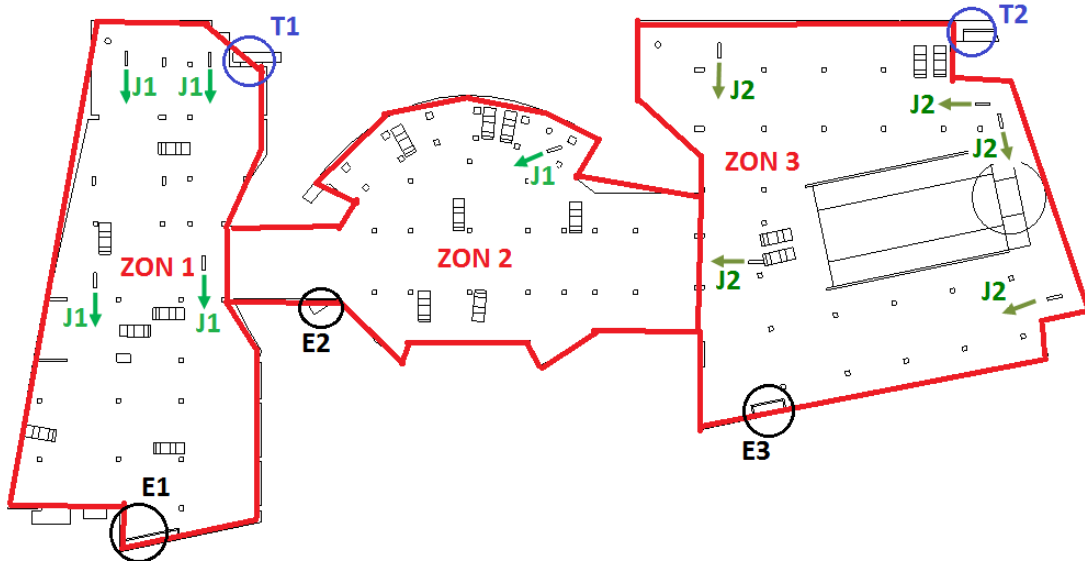
9.1.1 – Bir yangının saptanması halinde, ana egzoz fanları gerekli egzoz debisini sağlayacak şekilde ani olarak devreye girmelidir.

9.1.2 – Uygun bir erteleme süresi (yangın başlangıcından jetfanların devreye girdiği ana kadar geçen süre) sonrasında, jetfanlar dumanı verimli biçimde egzoz noktalarına yönlendirecek şekilde harekete geçmelidirler. Erteleme süresi, insanların kaçışı için öngörülen tasarım süresine uygun olmalıdır.

9.1.4 – Kapalı otoparktaki hava değişimi sayısı saatte en az 10 hava değişimi kadar olmalıdır.

Yangın kurtarma sistemi tasarımı yapılırken, kapalı hacim bağımsız ve birbiriyle ilişkisi olmayan – sanki – ayrı hacimlerden oluşuyormuş gibi düşünülür. Bu işleme duman kontrolüne yönelik bölgelere ayırma (zonlama) denir.

Bölgelere ayırma kapalı otopark uygulamasında, otopark kat taban alanının bağımsız alanlara bölünmesidir. Kat yüksekliği genel itibariyle tüm inşaatlarda aynı olduğu için etken parametre taban alanı olmaktadır. Bu tezin kapsamında kullanılan örnek inşaat projesinde de kat geometrisinin yapısı düşünülerek 3 bölge bir hacim düşünülmüştür.



Şekil 5.11: Kapalı otoparkta duman kontrol zonları, jetfanlar, taze hava ve duman egzoz şaftları.

Projede kullanılan egzoz şaftları (E1, E2 ve E3) ve taze hava şaftları (T1 ve T2) üstteki şekilde görüldüğü gibidir. Bunun dışında J1 tipi 6120 m³/h üfleme debisi, J2 tipi ise 9960 m³/h üfleme debisine sahip iki tip jetfan kullanılmış olup projedeki yerleşimleri de yukarıda görüldüğü gibidir. Saatte 10 hava değişimi için projede belirtilen şaft debileri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Çizelge 5.2: Otopark projesinde belirtilen egzoz ve taze hava şaft debileri.

Saatte 10 hava değişimi için	Zon 1	Zon 2	Zon 3	Toplam
Egzoz Debisi (m ³ /h)	60000	36750	72450	169200
Taze Hava Debisi (m ³ /h)	42000	(yok)	76400	118400

Hacimsel debi bakımından toplam egzoz debisi ile taze hava debisi eşit değildir. Bunun dışında toplam taze hava debisinden eksik kalan kısmın bir açıklıktan (dış havadan) temin edilmesi de düşünülen unsurlardan değildir. Burada iki debinin projelendirmede farklı olmasının nedeni gaz yoğunluklarının farklı oluşudur. İdeal gaz hal denkleminde yola çıkarak:

$$\frac{169200(m^3/h)}{118400(m^3/h)} = \frac{1}{0,69} = \frac{\rho_{tazehava}}{\rho_{egzoz}} \cong \frac{T_{egzoz}}{T_{tazehava}}$$

$$0,69 = \frac{(20 + 273,15)^{\circ} K}{T_{egzoz}}$$

$$T_{egzoz} = 424^{\circ} K = 151^{\circ} C$$

olarak hesaplanır ki egzoz şaftlarından geçerken yangın dumanının sıcaklığı ortalama 150 °C sıcaklık civarında olmaktadır. Bu şekilde egzoz ve taze hava toplam şaft debilerinin farklı oluşu da açıklanmış olur.

Çizelge 5.3: Her zonda toplam jetfan debisinin uygunluk kontrolü.

	Jetfan Debisi	Jetfan Adedi	Toplam Debi	Egzoz Debisi	Kontrol
Zon 1	J1-6120m ³ /h	x 4	24480m ³ /h <	60000m ³ /h	UYGUN
Zon 2	J1-6120m ³ /h	x 1	16080m ³ /h <	36750m ³ /h	UYGUN
	J2-9960m ³ /h	x 1			
Zon 3	J2-9960m ³ /h	x 4	39840m ³ /h <	72450m ³ /h	UYGUN

Amerikan Ulusal İş Güvenliği ve Sağlık Enstitüsü (US-NIOSH) normlarına göre havada 1200 ppm'lik (% 0,12) karbonmonoksit (CO) seviyesi, solunduğu anda öldürücüdür. Bu yoğunluğun altına inmiş olan CO yoğunluğunun, görünürlük izin verdiği ölçüde insan kaçışına uygun bir ortam oluşturduğu düşünülebilir. Yangından üreyen dumanın yaklaşık yarısının CO olduğu kabulüne dayalı olarak (NO_x, CO₂, N₂, SO_x, H₂, H₂O v.b. birçok molekülün ve türevin yanında) tehlikeli bakımdan ele alınabilecek *duman yoğunluğu çözümlerde 2000 ppm olarak alınmıştır*. m_k havadaki kirletici kütlesi ve m_s ise kaynaktaki kirletici kütlesi olmak üzere 1 ppm (parts per million) = 10⁶ m_k/m_s eşitliği geçerli olup sonuç görüntülemelerde ölçek üst limiti 2000x10⁻⁶ = 0,002 kütle oranı (mass fraction) kullanılarak kontür görüntüleri oluşturulmuştur.

Yapılan analizlerde kaynaktan yayılan kimyasal tür CO olmayıp ileride de anlatılacak olan yangın kaynağının tepkimeli akış kullanılmadan gerçeğine doğru bir benzetimi amacıyla tek basamaklı metan yanma tepkimesinden faydalanılmış ve yayılan tür olarak CO₂ tanımlanmıştır. Sonuç görüntülemelerinde yine ölçek üst sınırı olarak 0,002 değerinde kütle oranı kullanılmıştır.

5.3 Benzetimlerde Kullanılan Ortak Sınır Koşulları ve Hacimsel Kaynaklar

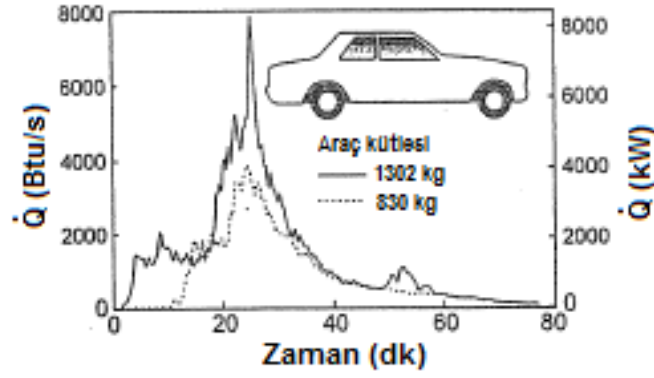
Her üç çalkantı modelinin karşılaştırması amacıyla yapılan analizlerde kullanılan sınır koşulları ortaktır. Duman egzoz ve taze hava şaftlarından endüstriyel tip fanlar aracılığıyla sevk edilen toplam hava debileri, şaft çıkış yüzeylerinde yüzeye dik hacimsel debi olarak tanımlanmıştır. En alt otopark katı olan sözkonusu 3. bodrum katın üstündeki katlara açılan kısmı olan araç iniş ve çıkış rampasının çıkış noktasında durağan ve sabit basınç ve sıcaklıkta atmosferik hava olduğu varsayılarak yarım küre yüzeyine sahip bir açıklık sınır koşulu kullanılmıştır. Ortamda yangının iki farklı noktada aynı anda ve aynı karakterde başladığı varsayılarak araç yangını yarım küre yüzeyli bir cisimden zamana bağlı taşınımsal ısı akısı, adyabatik alev sıcaklığı ve duman debisi karakteri tanımlanarak modellenmiştir. Bunun dışında jetfanlar da ortamdan aldığı havayı aynı ortama üfleyen turbomakineler olup sayısal benzetim açısından birer hacimsel momentum kaynağıdır.

5.3.1 Benzetimlerde yangının tanımlanması

Analizlerde yangın tanımlanırken üç önemli ana etken kullanılmıştır. Bunlar yukarıda da anlatıldığı gibi yangının taşınımsal (konvektif) ısı akısı, ışıma ile ortama ısı salımının modellenmesi için adyabatik alev sıcaklığı ve taşınımsal ısı akısını veren egzotermik yanma tepkimesi aracılığıyla duman üreme debisidir.

5.3.1.1 Yangın kaynağının konvektif ısı gücü

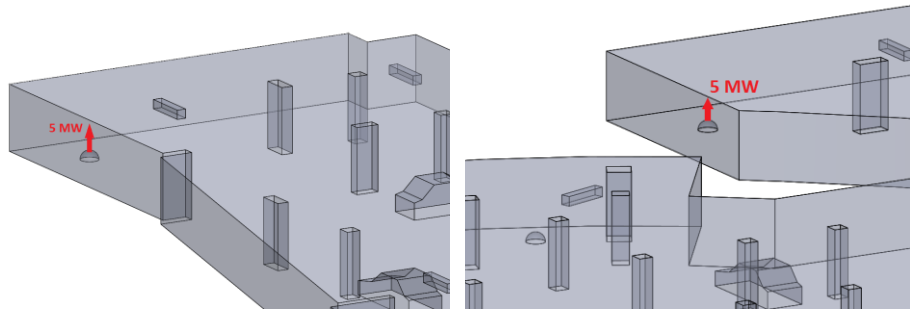
Yangın kaynağı olarak düşünülen cisimler birer otomobildir. Aşağıdaki şekilde Joyeux tarafından ölçülen ısı salım miktarı bilgisi görülmektedir. Analizlerde bir otomobilin yanmasıyla oluşan ısı salım gücüne denk bir yanma gücüne sahip metan yanması varsayımı yapılmıştır. Ortalama 1300 kg kütleli bir otomobilin yanması halinde ulaşılan doruk ısı salım miktarı yaklaşık 5 MW civarındadır.



Şekil 5.12: Otomobillere ilişkin yangın eğrisi, Klote & Milke (2002)'den uyarlanmıştır.

Yanında başka bir araç bulunmayan tekil binek taşıtların ısı salım güçleri 1,5 ila 8 MW arasında değişmektedir fakat yapılan deneylerin çoğunluğu ısı salım değerlerinin 5MW ve altı değerlerde olduğunu gösterir yöndedir. Yeni model otomobillerin eskilere kıyasla daha büyük ısı salım gücüne sahip olduğu şeklinde bir eğilim kaydedilmiştir (Lönnermark ve Ingason). Bu bilgiye de dayalı olarak ulaşılan doruk ısı salım miktarının 5 MW olduğu düşünülmüştür.

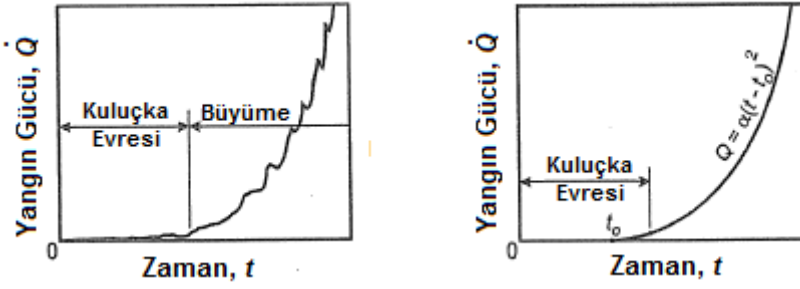
Yapılan analizlerde yanan otomobilleri temsil eden yangın noktalarının 5 MW'lık bir güçle ortama ısı yaydığı varsayılmıştır.



Şekil 5.13: İki yangın konumundaki ısı salım güçleri.

Büyüme evresi

Meydana geldiği varsayılan eş zamanlı araç yangınlarının ısı salım güçleri saniye cinsinden geçen zamanın karesi (t^2) yasasına uyar. Yangın başlangıcında yanıcı malzemelerin tutuşmaya başlamak için geçirdiği ilk evreye kuluçka evresi denir. Kuluçka evresinin bitişi, tamamlanmış yangın büyümesine başlangıç anıdır.



a) Tipik bir yangın başlangıcı b) İdealize parabolik yangın başlangıcı

Şekil 5.14: Yangın başlangıç evresinde ısı salımının zamana bağlı davranışı, Klote ve Milke (2002)'den uyarlanmıştır.

Yangın başlangıcındaki kuluçka süreci yok sayılırsa ısı salımı için

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (5.1)$$

denklemi yazılabilir (t^2 yasası). Burada t saniye cinsinden zaman ve α yangın büyüme hızı katsayısıdır. Bu çalışmanın amaç ve kapsamı çalkantı modeli etkilerinin anlaşılması olduğundan dolayı iş bilgisayarı donanımı, sayısal ağ eleman sayısı ve süre kısıtları gözönünde bulundurularak yangınların 5 dakika sonunda doruk ısı salım güçlerine ulaştığı varsayılmış olup bu amaca yönelik olarak $\alpha = 0,055$ (kW/s²) seçilmiştir.

Zayıflama evresi ve yağmurlama sisteminin etkisi

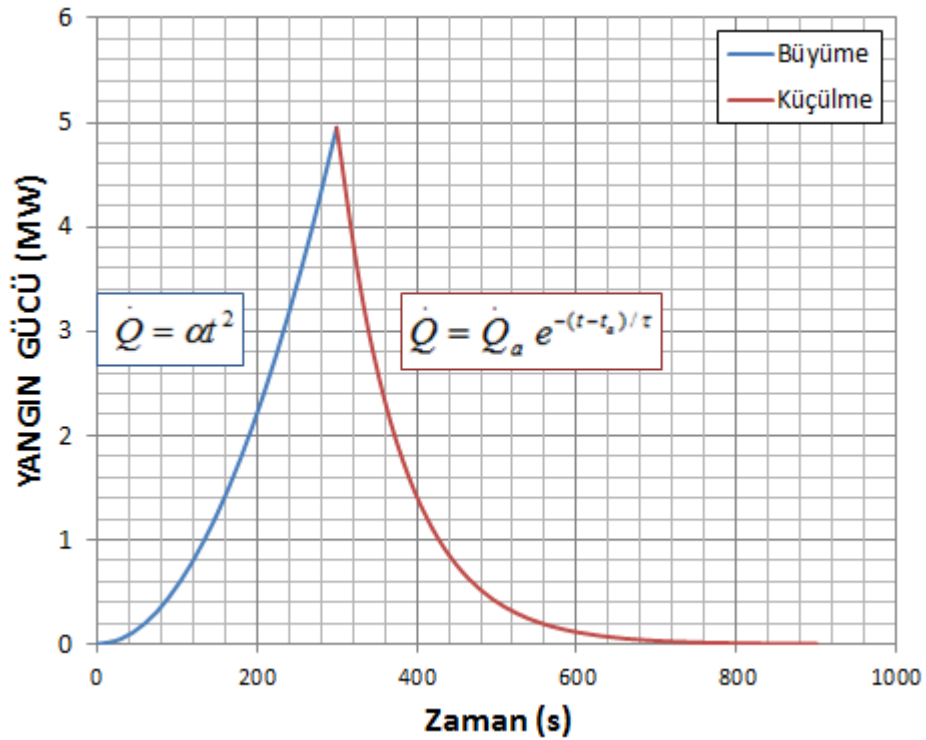
Kapalı otoparklarda yangın oluşumu halinde ortaya çıkan karbonmonoksitin (CO) algılanmasıyla devreye giren yağmurlama (sprinkler) sistemleri kullanılmaktadır. Bir yağmurlama sisteminin olmadığı yada yangına müdahale edilmediği durumda tipik bir yangın davranışı aşağıdaki şekilde gibidir. Yangın ilk ateşlemeyi takiben “büyüme” evresinden geçer ve “parlama” anına ulaşır. Parlama sonrasında yangın bir süre boyunca “tam gelişmiş yangın” olarak devam eder ve son olarak da “küçülme” (sönme) evresini tamamlayarak son bulur. Yağmurlama sistemleri birim alana birim zamanda bıraktıkları su hacmine bağlı olarak yangının küçülme (sönme) davranışını belirlerler ve yangının tam gelişmiş yangın haline gelmesine izin vermeden doğrudan küçülme evresini başlatır. Yangın gücünün küçülme davranışını öngörmek aşağıdaki denklemle mümkündür.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_a e^{-(t-t_a)/\tau} \quad (5.2)$$

Burada $\dot{Q}_a$ yağmurlama sisteminin devreye girdiği andaki etkin yangın gücü değeri, t_a yağmurlama başlangıç anı ve τ ise zaman sabitidir. Zaman sabitinin ifadesi

$$\tau = \frac{6,15}{w^{1,85}} \quad (5.3)$$

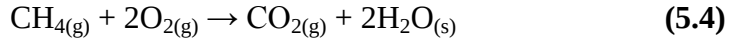
şeklindedir. w parametresi yağmurlama sprej yoğunluğudur ve buradaki kullanılışı itibariyle birimi gpm (feet kareden dakikada geçen galon) olup $1 \text{ gpm/ft}^2 = 0,00586 \text{ (mm}^3/\text{s)}/\text{mm}^2 = 0,00586 \text{ mm/s}$ dönüşümü sözkonusudur. Bu çalışma kapsamındaki benzetimlerin tasarımı esnasında 9 dakikalık bir süreç ele alındığından dolayı 9 dakika sonunda yangının ısıl gücünü çok zayıf hale getirmesi düşünülen bir tasarım sprej yoğunluğu kullanılmıştır. $0,25 \text{ gpm/ft}^2 = 0,00146 \text{ mm/s}$ değerindeki sprej yoğunluğu seçilmiş olup t^2 yasasına göre büyüyen ve bir tasarım yangınına ait olarak doruk değeri olan 5 MW'lık güçten yukarıdaki küçülme yasasına göre küçülerek eriyen yangın ısı salım gücü karakteri aşağıda görüldüğü gibidir.



Şekil 5.15: Tasarım yangını gücünün zamana bağlı davranışı.

5.3.1.2 Duman üreme debisi

Gerçek bir araç yangını olması halinde çok farklı malzemeler farklı karakteristiklerle yanmaktadır. Farklı maddelerin yanma davranışını modellemenin zorluğu nedeniyle yalnızca tasarım yangınının üreteceği duman miktarını öngörmek için metanın tek basamaklı evrensel kimyasal reaksiyon denkleminden faydalanılmıştır.



Bu reaksiyon denkleminden hareketle denklemin açığa çıkardığı mol başına enerji miktarından yola çıkılarak 5 MW'lık güçle enerji üretimi için salınması gereken karbondioksit debisi bulunur. Aşağıda, reaksiyonda geçen kimyasal türlerin oluşum entalpileri görülmektedir.

Çizelge 5.4: Bir basamaklı metan yanmasında rol alan kimyasal türler, Glassman ve Yetter (2008)'den uyarlanmıştır.

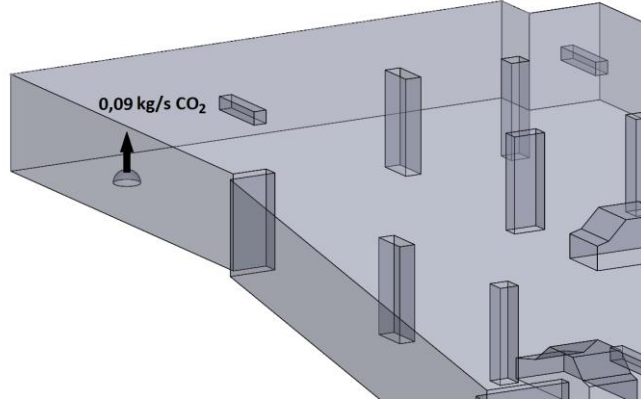
Kimyasal Tür	Adı	Hali	ΔH_f° (kJ/mol)
CH ₄	Metan	Gaz	-74,87
O ₂	Oksijen	Gaz	0
CO ₂	Karbondioksit	Gaz	-393,52
H ₂ O	Su	Sıvı	-285,83

Kimyasal reaksiyondan açığa çıkan mol başına enerji hesaplanabilir.

$$Q_{\text{çıkan}} = \sum(\Delta H_f^\circ)_{\text{giren}} - \sum(\Delta H_f^\circ)_{\text{çıkan}} \quad (5.5)$$

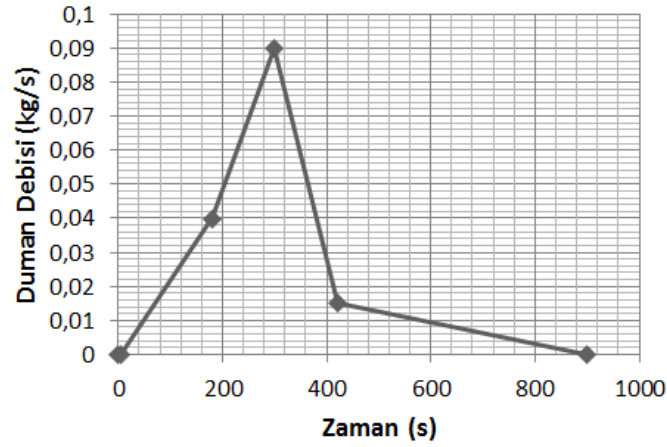
$$Q_{\text{çıkan}} = [1 \times (-74,87) + 2 \times 0 - (1 \times (-393,52) - 2 \times (-285,83))] \text{ [kJ/mol]} = 890,31 \text{ kJ/mol}$$

Karbondioksitin mol kütlesi = 16,042 g/mol 'dür. Bu bilgiler ışığında (1 kg CO₂ ürettiğinde) 890310/16,042 = 55498,69 kJ/kg enerji tepkimeden açığa çıkmış olur. Buna istinaden 5 MW'lık yangın gücü oluşturan bir yanma halinde de doğru orantılı olarak 5000/55498,69 = 0,09 kg/s debiyle CO₂ gazı ortama salınıyor anlamına gelir.



Şekil 5.16: Ortama yangın kaynaklarından giren duman debisi.

Yangın dumanının ortama giriş yaptığı debisi 0,09 kg/s olarak benzetimlerde tanımlanmıştır. İdealize edilmiş bir hal olarak tepkimeden üremesi beklenen gaz halindeki su buharının üremeyip sıvı olarak gaz taşınımı ve diğer süreçlere etkili olmadığı varsayılmıştır. Ortama yangın kaynaklarından giren duman debisinin de yangının ısı salım gücü ile ölçekli olması gerektiği düşünülerek zamana bağlı sınır koşulu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.17: Tasarım yangını duman debisinin zamana bağlı davranışı.

Doruk değeri 0,09 kg/s olacak şekilde parçalı-doğrusal (piecewise-linear) bir formda duman debisi sınır koşulu yukarıdaki grafikteki gibi oluşturulmuştur. Isıl gücün tanımlanmasında kullanıldığı gibi duman debisi için de zamana bağlı sınır koşulları oluşturulurken CFX ifade dili olan CEL kullanılmıştır.

5.3.1.3 Yangın kaynağının yüzey sıcaklığı (ışınimsal ısı akısı)

Duman üreme debisi için kullanılan bir basamaklı metan yanma tepkimesini temel olarak metan-hava karışımı için stokiometrik yanmada ve 1 atm basınçta adyabatik alev sıcaklığı olan 2210 °K ‘nin (Glassman ve Yetter, 2008) yangın kaynağında yüzey sıcaklığı olarak kullanılması ilk etapta düşünülmesine rağmen yapılan literatür taramasına istinaden deneysel çalışmaların bir araç yangınında bu kadar yüksek sıcaklıklara ulaşılmadığını gösterdiği görülmüştür.

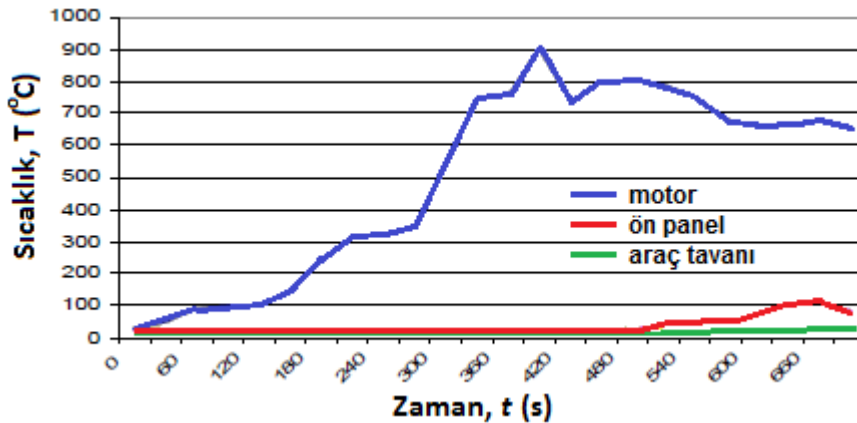


a) Yanmadan önce



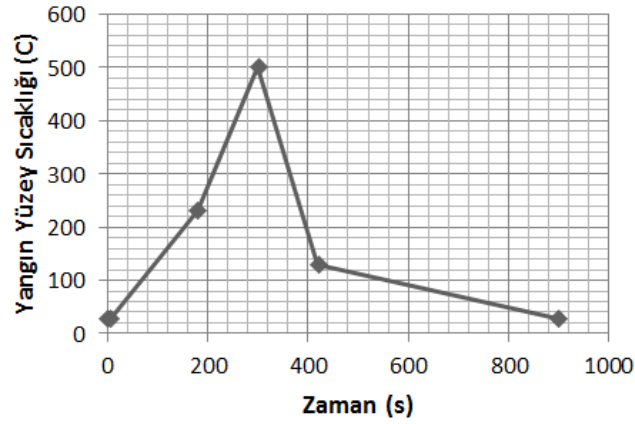
b) Yanmadan sonra

Şekil 5.18: Motor bölümünde yangın çıkmış bir otomobil, Halada ve diğ. (2012)’den uyarlanmıştır.



Şekil 5.19: Motor bölümünde yangın çıkan bir araç için ulaşılan sıcaklıklar, Halada ve diğ. (2012)’den uyarlanmıştır.

Kapalı otoparkta bir otomobilin motor bölümünde yangın çıkması halinde ulaşılan sıcaklık maksimum 1000 °C dolayında olabilmektedir ancak bu çalışma kapsamında yapılan benzetimler için düşünülen tasarım yangınına 300. saniyede yağmurlama sisteminin etki edeceği varsayıldığından dolayı, yangın yüzey sıcaklığı için doruk değeri 500 °C seçilmiş olup zamana bağlı davranışı CEL aracılığıyla ısıl güçle ölçekli olarak tanımlanmıştır.

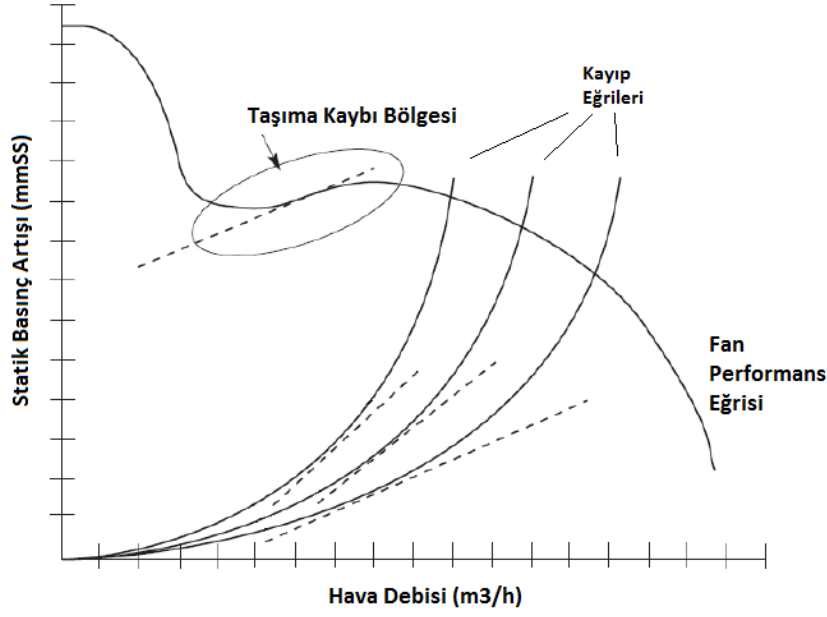


Şekil 5.20: Tasarım yangını yüzey sıcaklığının zamana bağlı davranışı.

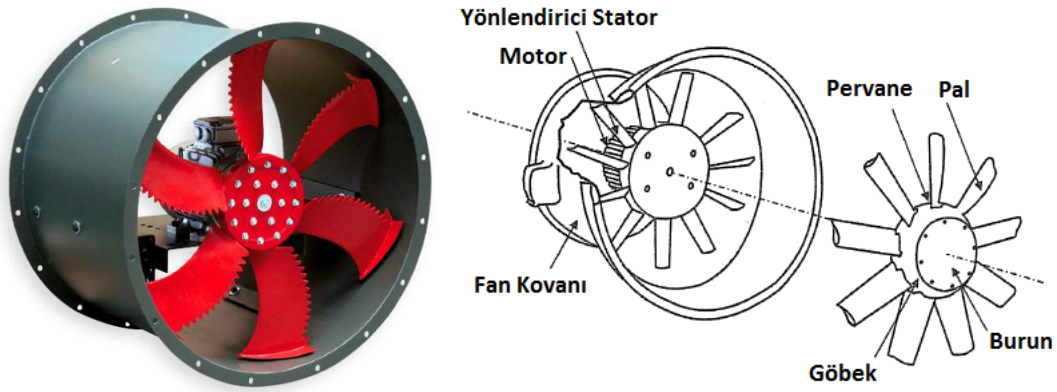
5.3.2 Egzoz ve taze hava şaftlarında tanımlanan debiler ve açıklıklar

Benzetimlerin her birinde kullanılan egzoz ve taze hava şaftı debileri yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı gibi, otopark yangın projesi kapsamında seçilen şaft egzoz ve taze hava fanlarına ait debilerdir. Benzetimlerin başlangıcında hesaplama uzayı genelindeki akış alanında ve özellikle şaftların ortama açılan duman pencereleri bölgelerinde yüksek hızlardan ve hız gradyenlerinden kaynaklanan sayısal kararsızlık oluşumlarının (CFL koşulu) önüne geçmek için şaft debileri benzetim başlangıcından itibaren 30. saniye sonuna kadar doğrusal tırmandırılarak artırılmış ve değerlerine oturtulmuştur. Gerçekte egzoz ve taze hava şaftlarında hava sevkine neden olan sistemler endüstriyel tipteki egzoz ve taze hava fanları olup fanlar performans karakteristik eğrilerinde bulunan basınç farkı – debi eğrisine göre çalışırlar. Sisteme ait kayıp eğrisi fanın karakterinde bulunan taşıma kaybı (stall) bölgesi olarak da anılan “kararsızlık bölgesine” denk gelmediği sürece fan iki eğrinin kesişim noktasının apsis ve ordinatı olan debi ve basınç farkı değerinde çalışacaktır.

Betonarme şaftlarda fanların yenmeye çalıştığı sistem kayıp değerleri düşük olmaktadır ve fanlar zorlanmadan çalışabilmektedir. Bu nedenle de egzoz ve taze hava fanlarının serbest üflemedeki performans değerleriyle çalıştıkları varsayılabilmiştir.



Şekil 5.21: Fanlarda çalışma noktasının belirlenmesi.



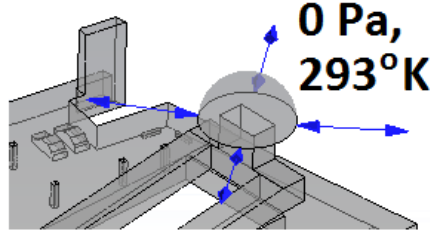
Şekil 5.22: Egzoz yada taze hava şaftlarında kullanılan endüstriyel tip eksenel fan.

Yangın projesinde fanların seçiminde de aynı kriter dikkate alınarak fan seçimi yapılmış olup egzoz ve taze hava şaftı sınır koşulu olarak 30. saniyeye kadar doğrusal artıp devamında sabit değerde kalan ve yüzeye dik hava debisi (hız) sınır koşulu uygulanmıştır. Bütün sınır koşullarında herhangi bir t anında Y yüzeyi için (n^+ herhangi bir sınırdaki yüzey normali yönündeki uzay koordinatı) Neumann + Dirichlet sınır koşulları ayrı olarak

$$U_Y = U(Y, t) \quad (5.6)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_Y = f(Y, t) = 0 \quad (5.7)$$

şeklinde geçerlidir. Akış alanının dengeye oturması için yeterince beklendikten sonra oluşan şaft debileri sınır koşulları egzoz ve taze hava debilerinin verildiği çizelgedeki gibidir. Açıklık olarak bulunan tek yer otopark katından bir üst kata araç iniş-çıkışını sağlayan rampalardan sevk olablen havadır. Bu rampa çıkışlarının ikisini de kapsayacak şekilde yarım küre biçimli bir açıklık sınır koşulu kullanılmıştır.



Şekil 5.23: Rampa çıkışlarında kullanılan açıklık sınır koşulları.

Basınç ve sıcaklık değerleri analizler boyunca sabit değerde tutulmuş olup burada da Neumann + Dirichlet sınır koşulları birlikte sözkonusudur.

5.3.3 Duvar davranışı

Duvar diplerinde “standart duvar fonksiyonları (standard wall functions)” kullanılmıştır. Yangın için oluşturulan sayısal ağda duvar diplerinde sınır tabakayı dikkate alacak mertebede “ince” bir ağ tabakası oluşturulmamıştır ancak CFX ‘de $k-\epsilon$ dahil LES ve DES türbülans modellerinde de kullanılan duvar davranışını özetlemek gerekirse

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln(y^+) + C \quad (5.8)$$

şeklinde bilinen logaritmik sınır tabaka bölgesine ait boyutsuz hız değeridir (K : von Karman sabiti). Δr duvar dibinde komşu iki düğüm arasındaki uzaklık olarak

$$y^+ = \frac{\Delta r \sqrt{\tau_w / \rho}}{\nu} \quad (5.9)$$

şeklinde genelgeçer kullanılan standart duvar yakını boyutsuzlaştırılmış sınır tabaka kalınlığıdır. ν kinematik viskozite, ρ akışkan yoğunluğu ve

$$\tau_w = \rho u^* u_\tau \quad (5.10)$$

olup

$$u^* = C_\mu^{1/4} \kappa^{1/2} \quad (5.11)$$

$$u_{\tau} = \frac{U_{\infty}}{\frac{1}{K} \ln(y^*) + C} \quad (5.12)$$

$$y^* = (\rho u^* \Delta y) / \mu \quad (5.13)$$

denklemleri tamamlar. U_{∞} sınır tabaka dışındaki serbest akım hızı ve C_{μ} çalkantı modeli katsayısıdır.

Duvarlar ısıtım açısından “adyabatik duvar” seçilmiştir. Duvarlar benzetimlerde sabit sıcaklıkta (20°C) tanımlanmış yüzeyler olup gelen ısıtım güç yoğunluğu G_f bu halde saçılan ısıtım güç yoğunluğu E_{bf} ’ye eşit alınarak duvarlardan ısıtım aracılığıyla enerji soğurulması söz konusu değildir ve

$$\frac{\varepsilon_f}{2(2 - \varepsilon_f)} (E_{bf} - G_f)_{duvar} = 0 \quad (5.14)$$

olur. Özetle $E_{bf} = G_f$ şeklinde gelen ve yansıyan ısıtım değerleri birbirine eşittir.

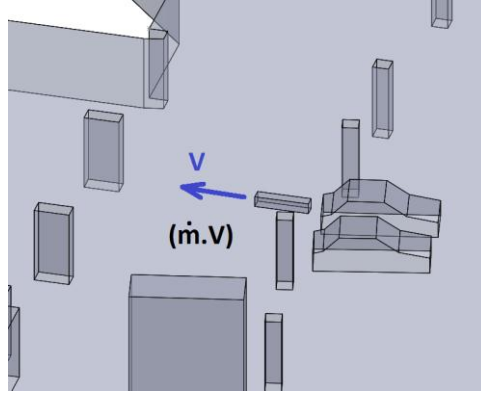
5.3.4 Jetfanlar

Jetfanlar birer sabit hacimsel debi cihazıdır. Kullanım amaçları otopark katında biriken yangın dumanını bir jet etkisiyle egzoz şaftlarının etki bölgesine püskürtmek ve egzoz işlemine yardımcı olmaktır.



Şekil 5.24: Jetfanların otoparktaki kullanımı, v.d.Giesen ve diğ. (2010)’dan uyarlanmıştır.

CFX’de hacimsel momentum kaynağı tanımlamak mümkün olduğundan dolayı jetfanların etkileri alt-uzay (sub-domain) olarak ifade edilen prizmatik cisimlerden tercihli bir yönde üretilen momentum kaynağı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.25: Jetfan debisinin momentum kaynağına dönüştürülmesiyle kullanımı.

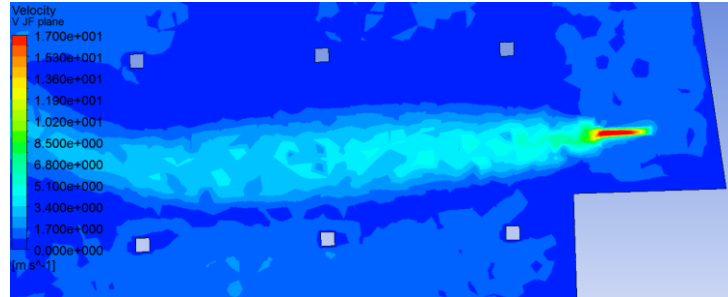
A_{jf} kesit alanına sahip bir jetfan ortalama U_o hızı ile üfleme yaparsa ve sevk edilen akışkanın yoğunluğu (hava yoğunluğu) ρ_{jf} ise kütleli debi

$$\dot{m} = \rho_{jf} A_{jf} U_o \quad (5.15)$$

olup H_{jf} jetfanın iç bölümünün hacmi ve L_{jf} ise jetfanın silindirik iç hacminin boyu olarak hacimsel momentum kaynağı M_s

$$M_s = \frac{\dot{m} U_o}{H_{jf}} = \frac{\rho_h A_{jf} U_o^2}{H_{jf}} = \frac{\rho_h U_o^2}{L_{jf}} \quad (5.16)$$

şeklinde CFX 'de tanımlanmıştır.



Şekil 5.26: Jetfan üflemesinin benzetim görüntüsü.

5.4 Benzetim Sonuçları ve Çalkantı Modellerinin Karşılaştırılması

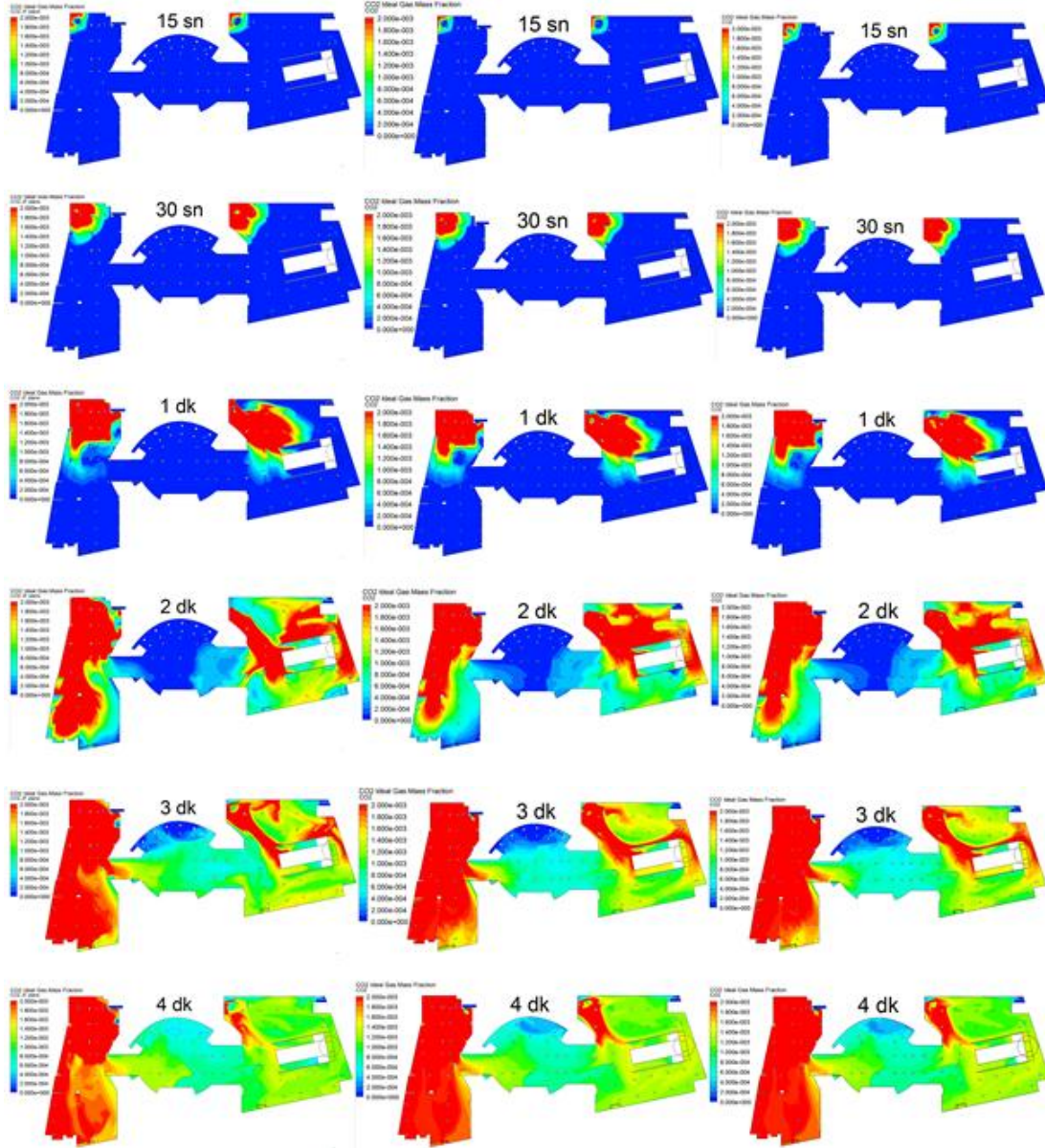
5.4.1 CO₂ kütle oranlarının karşılaştırılması

5.4.1.1 Tavan jeti düzlemi (2,5 m yükseklik)

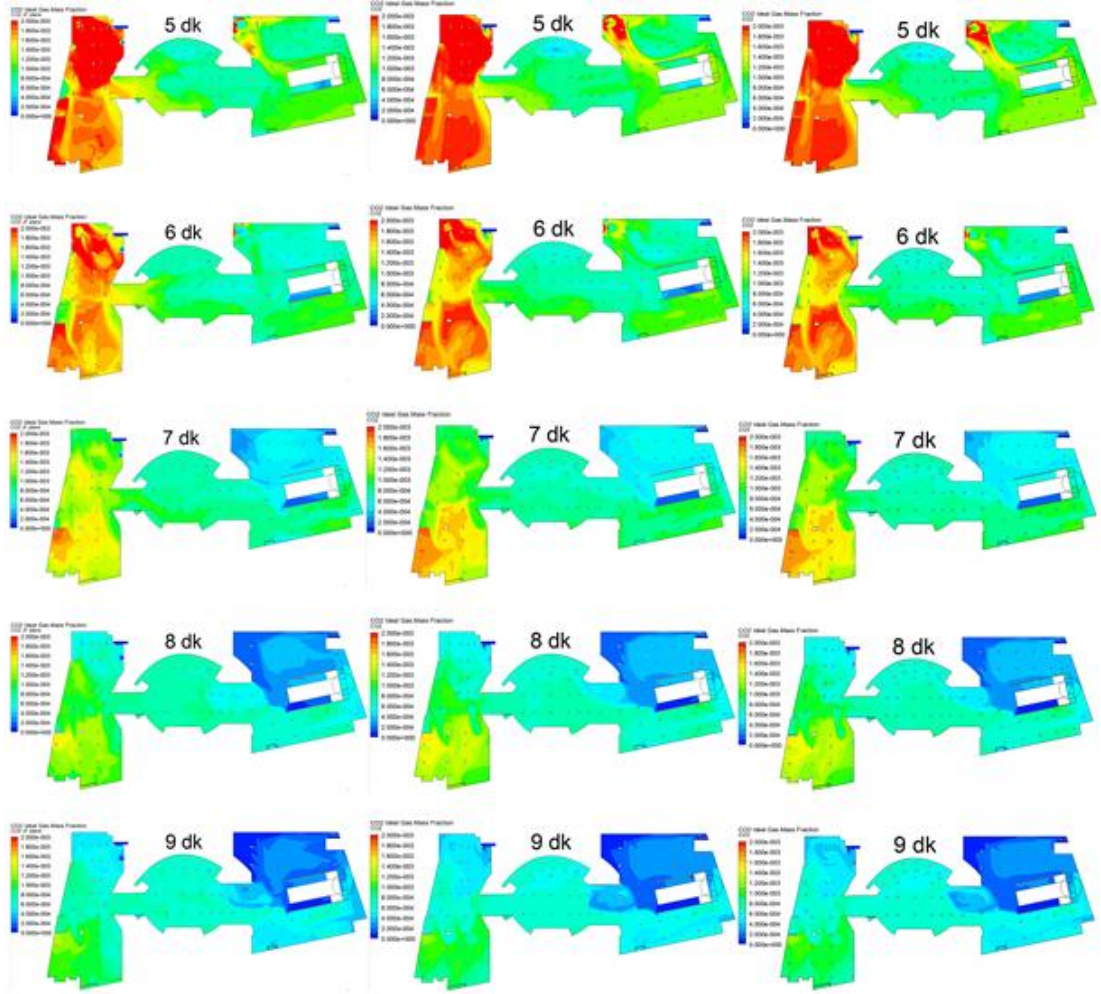
k-ε

LES

DES



Şekil 5.27: Tavan jeti düzleminde (2,5 m) CO₂ kütle oranlarının zamana bağlı karşılaştırması.



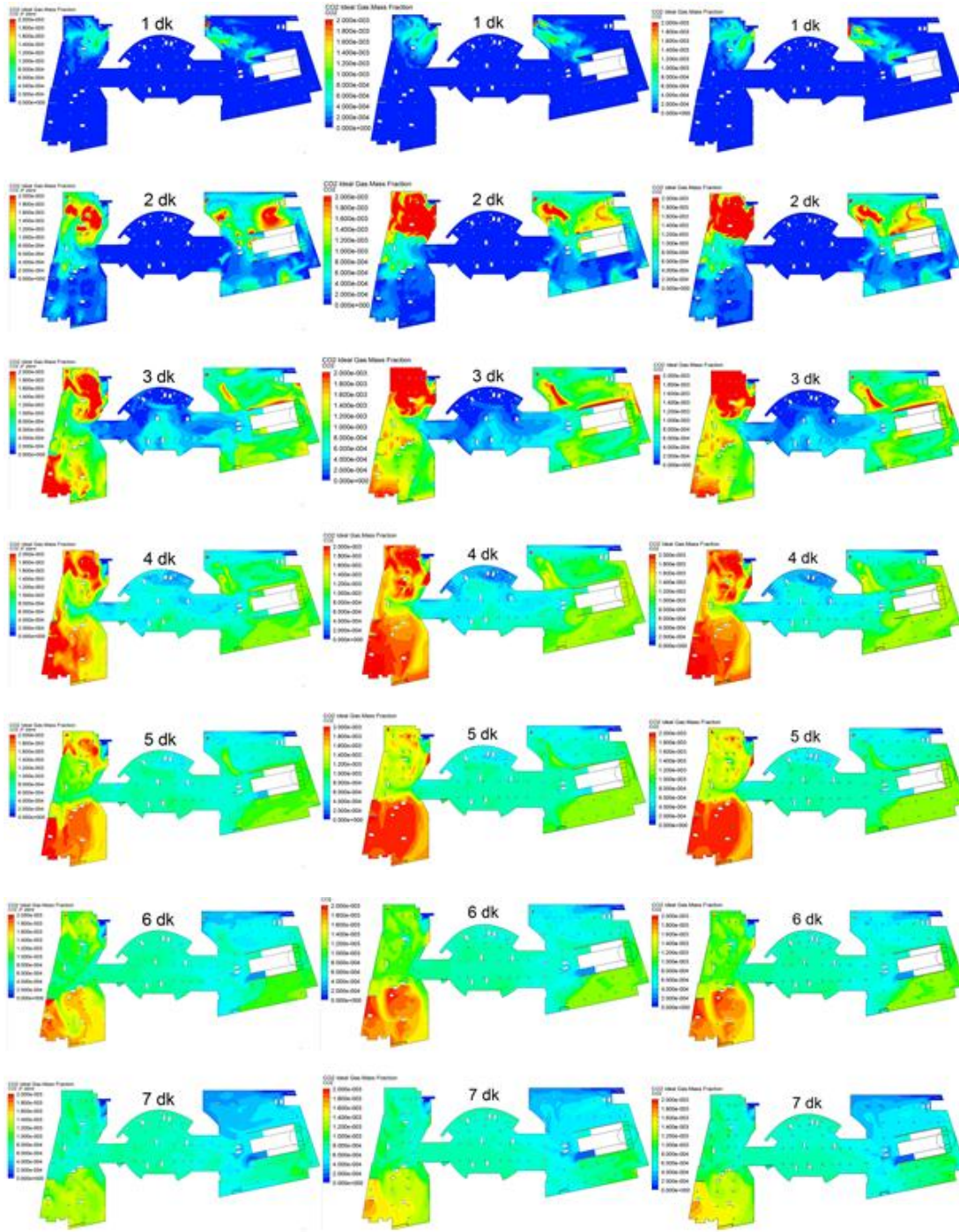
Şekil 5.27 (devam): Tavan jeti düzleminde (2,5 m) CO₂ kütle oranlarının zamana bağlı karşılaştırması.

5.4.1.2 Bel düzlemi (1 m yükseklik)

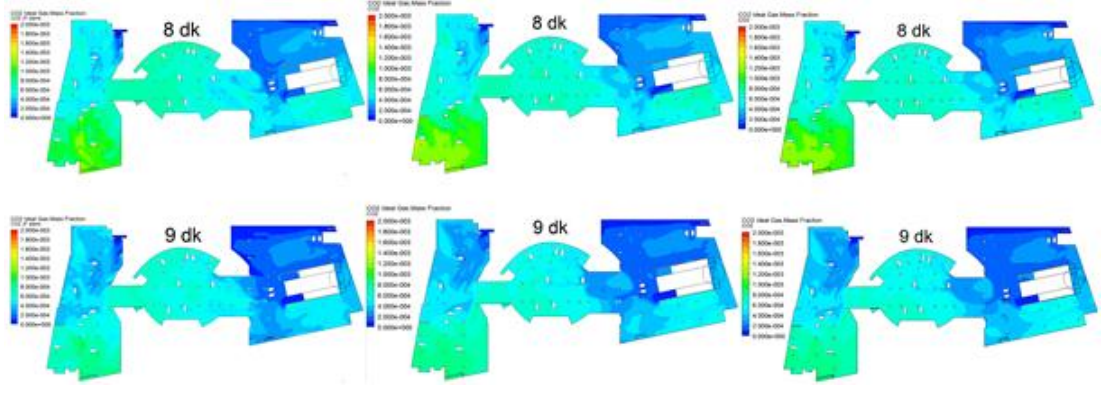
k-ε

LES

DES

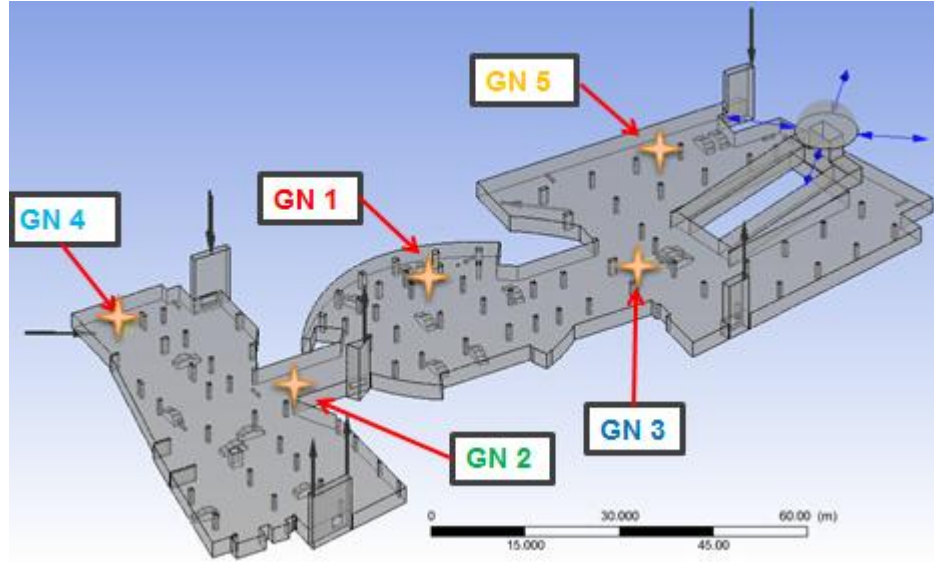


Şekil 5.28: Bel seviyesi düzleminde (1 m) CO₂ kütle oranlarının zamana bağlı karşılaştırması.

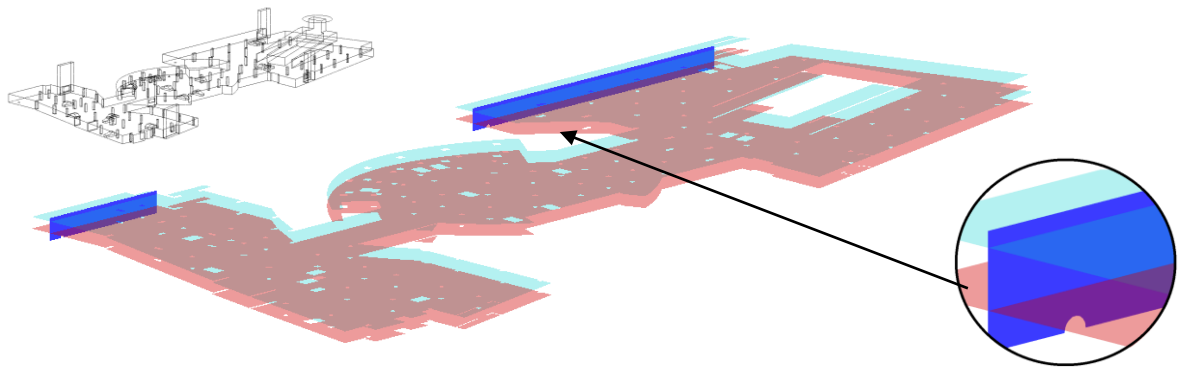


Şekil 5.28 (devam): Bel seviyesi düzleminde (1 m) CO₂ kütle oranlarının zamana bağlı karşılaştırması.

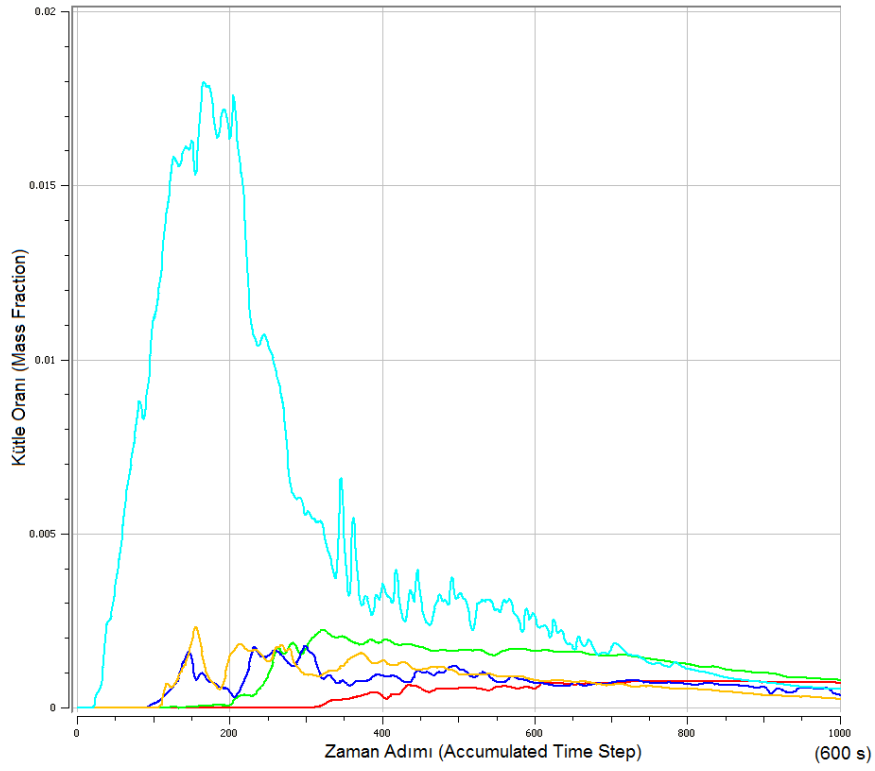
5.4.1.3 Görüntüleme noktalarında CO₂ kütle oranlarının zaman davranışı



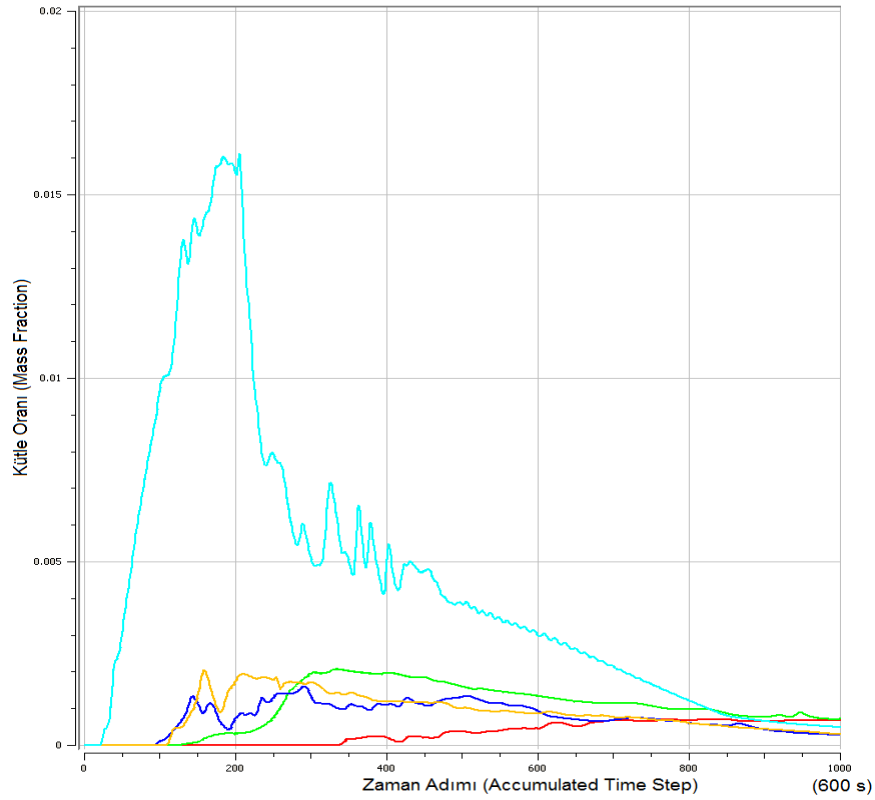
Şekil 5.29: Çözüm uzayından örnekleme yapılan görüntüleme noktaları.



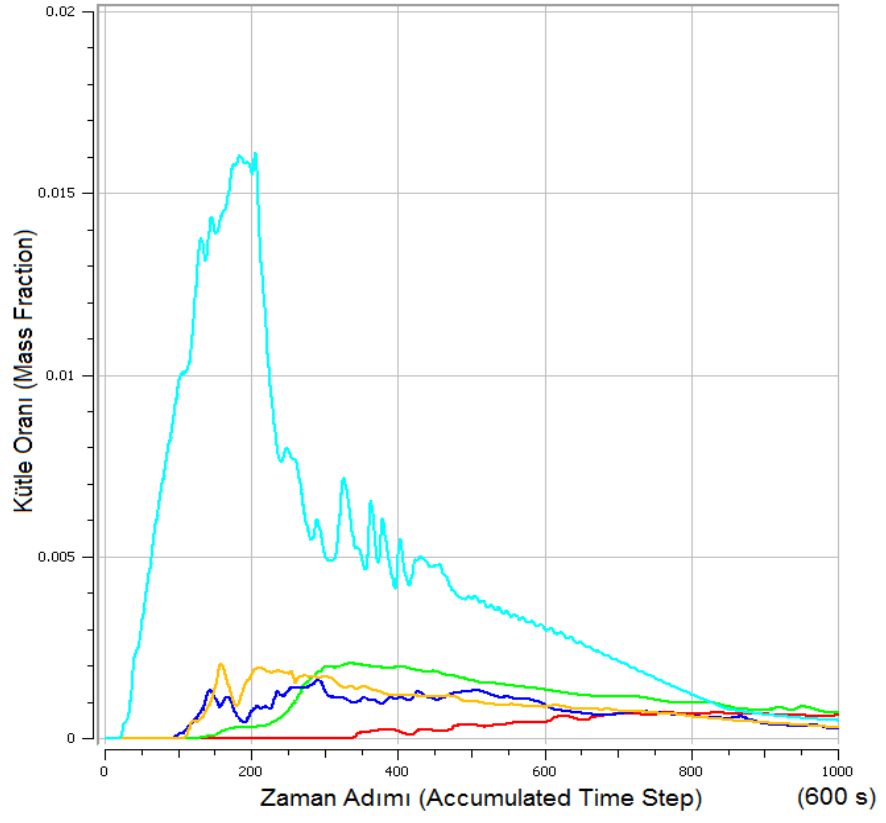
Şekil 5.30: Çözüm uzayı için sonuç görüntüleme düzlemleri.



Şekil 5.31: $k-\epsilon$ modeli için görüntüleme noktalarında kütle oranı-zaman grafiği.



Şekil 5.32: LES modeli için görüntüleme noktalarında kütle oranı-zaman grafiği.



Şekil 5.33: DES modeli için görüntüleme noktalarında kütle oranı-zaman grafiği.

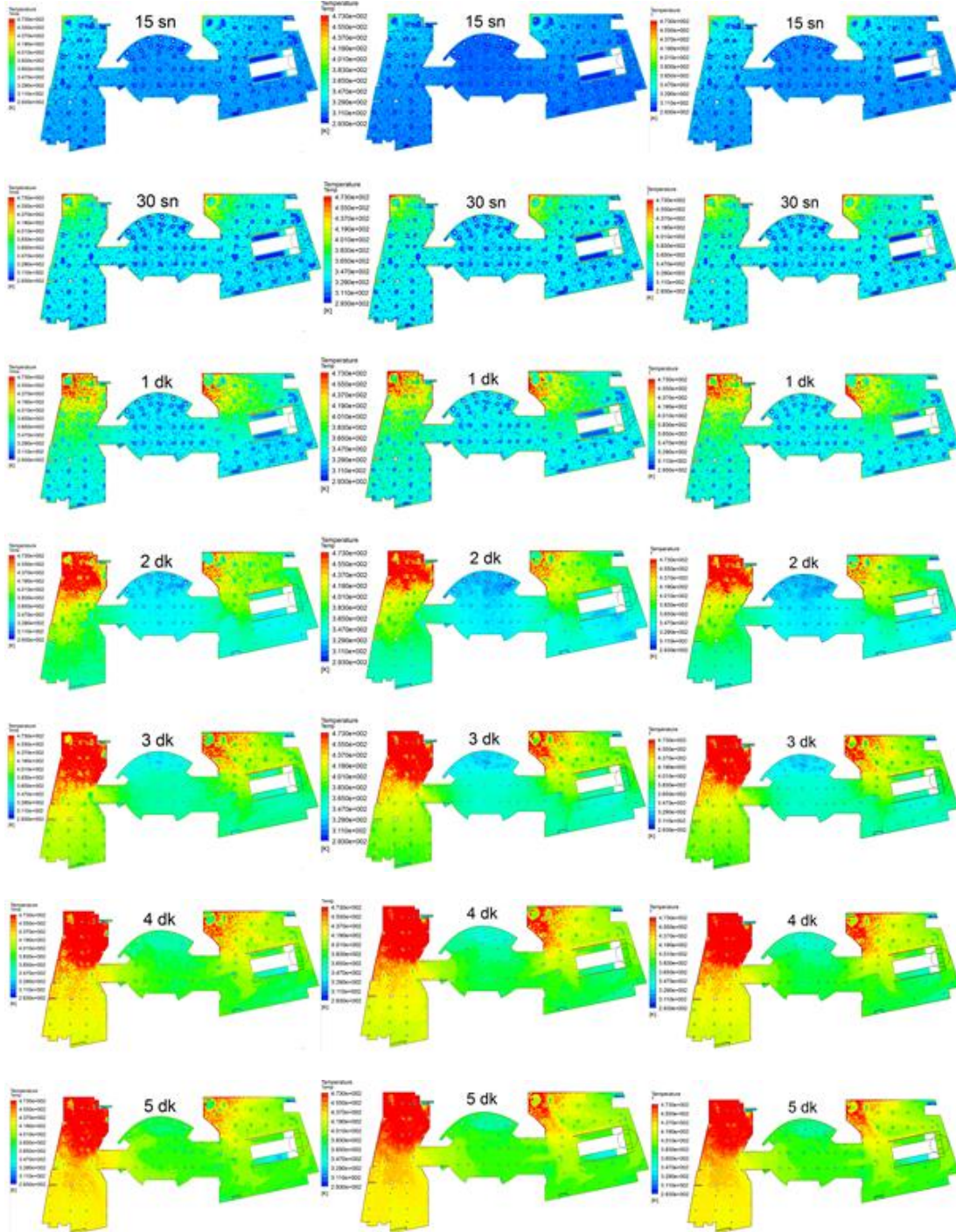
5.4.2 Sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması

5.4.2.1 Tavan jeti düzlemi (2,5 m yükseklik)

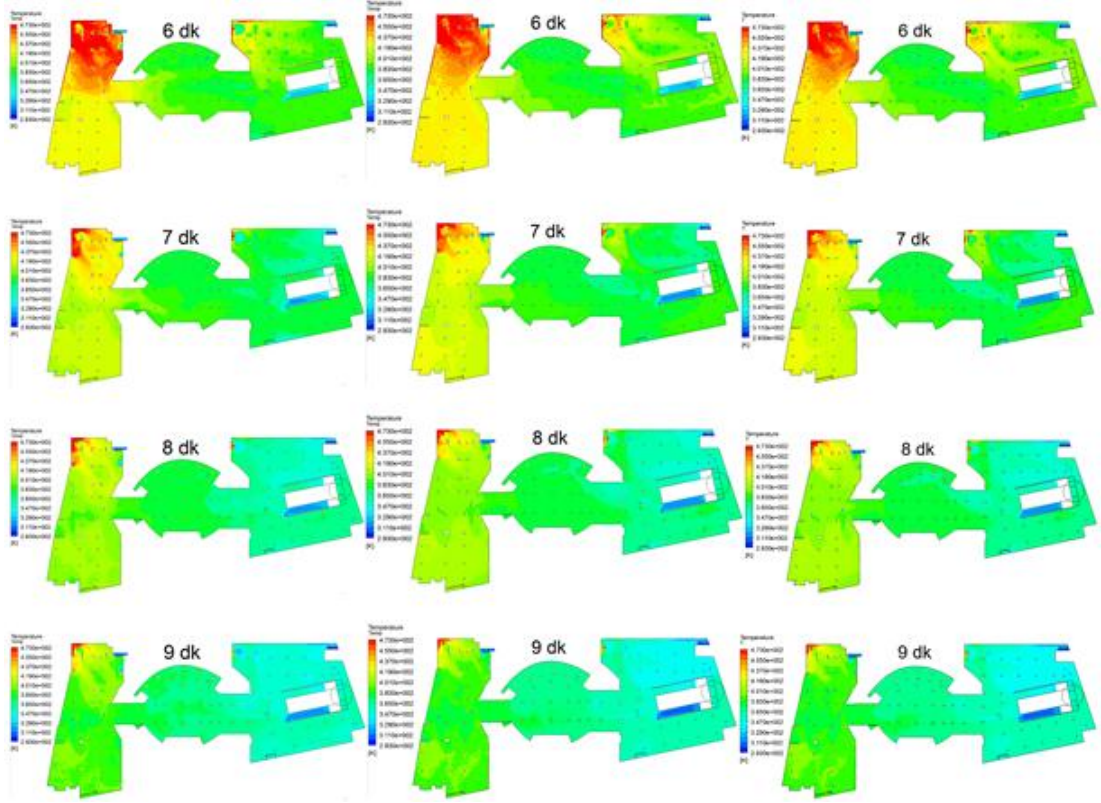
k- ϵ

LES

DES

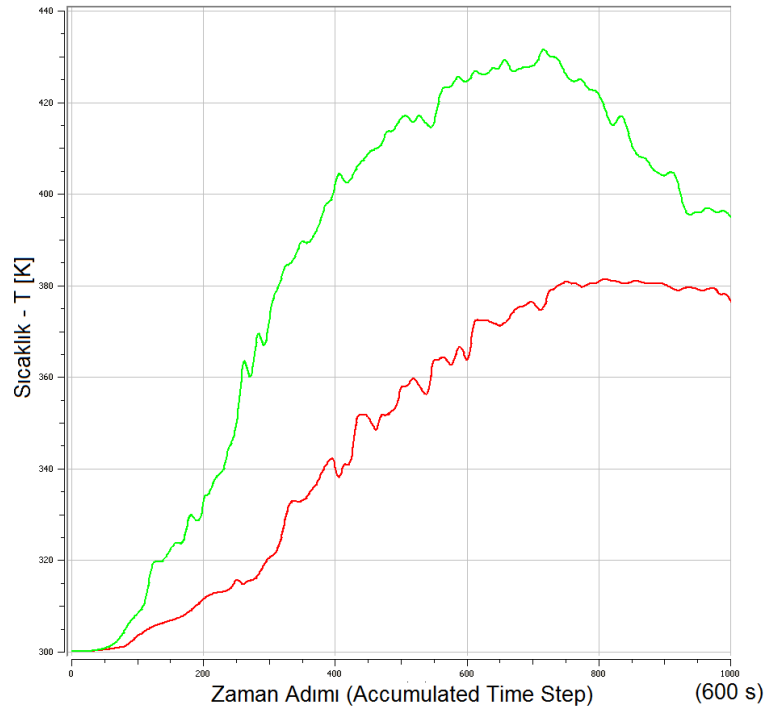


Şekil 5.34: Tavan jeti düzleminde (2,5 m) sıcaklıkların zamana bağlı karşılaştırması.

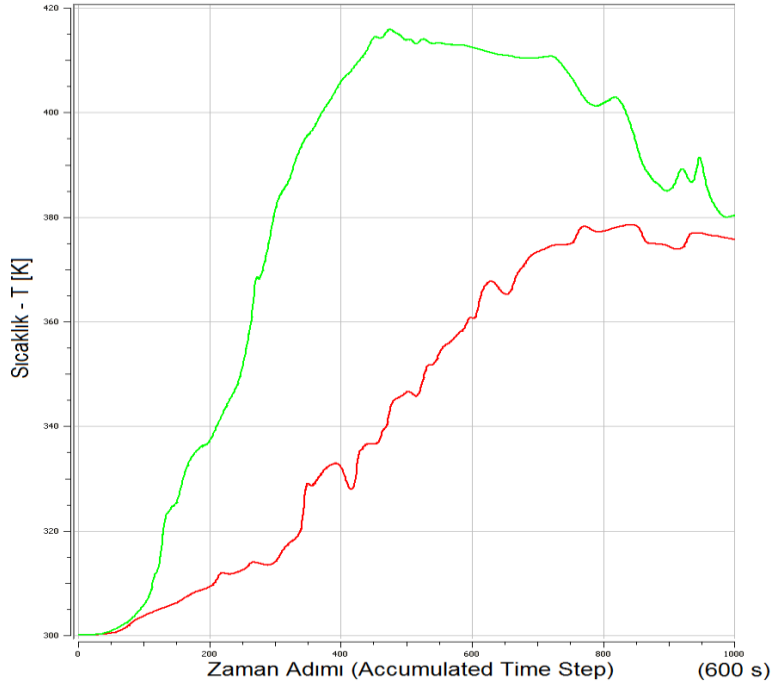


Şekil 5.34 (devam): Tavan jeti düzleminde (2,5 m) sıcaklıkların zamana bağlı karşılaştırması.

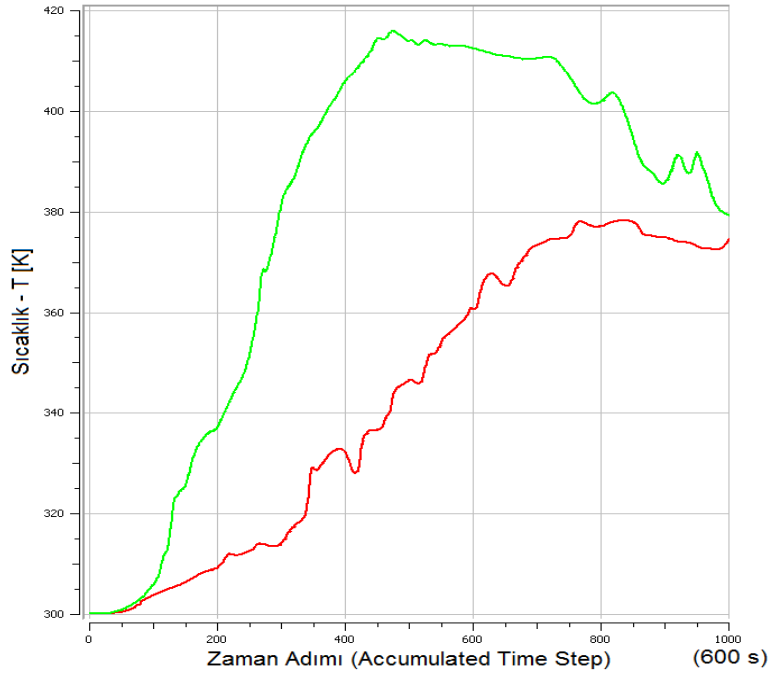
5.4.2.2 Ölçüm noktalarında sıcaklığın zaman davranışı



Şekil 5.35: k-ε modeline göre GN1 ve GN2 ölçüm noktalarında sıcaklık-zaman grafiği.



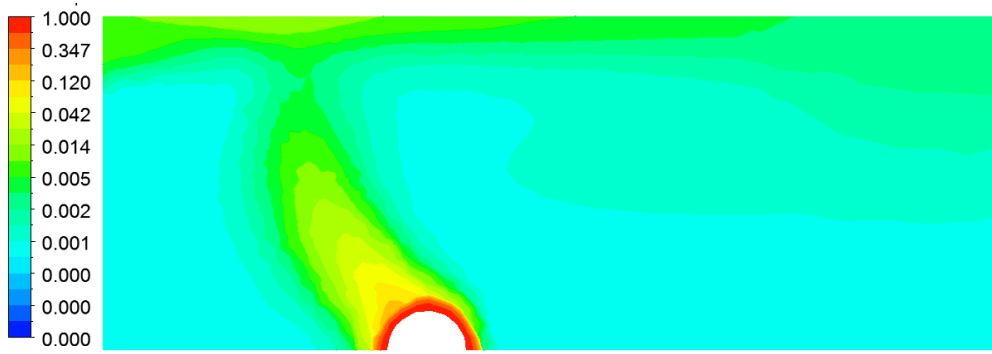
Şekil 5.36: LES modeline göre GN1 ve GN2 ölçüm noktalarında sıcaklık-zaman grafiği.



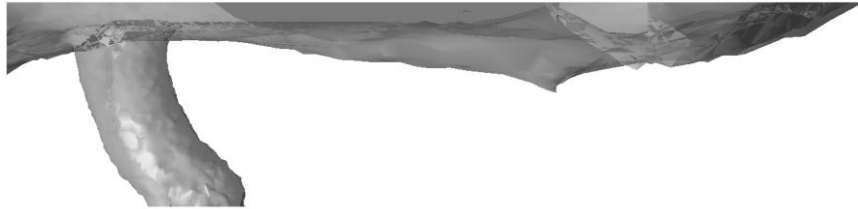
Şekil 5.37: DES modeline göre GN1 ve GN2 ölçüm noktalarında sıcaklık-zaman grafiği.

5.4.3 Yangın noktalarında akışkan davranışının karşılaştırılması

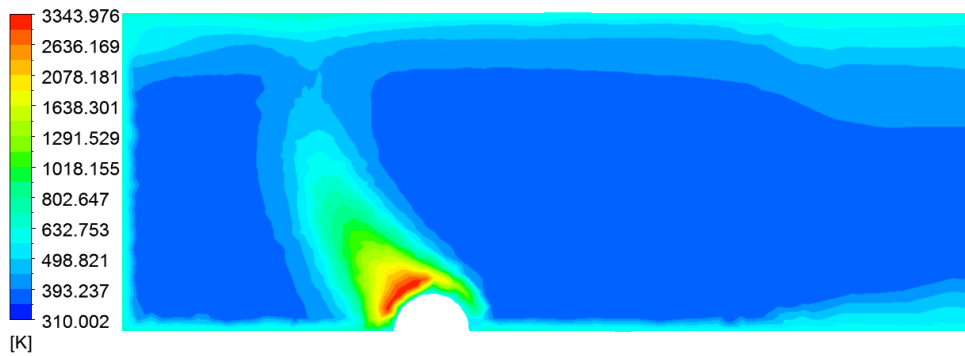
Yangın merkez ekseninde oluşan sıcaklığın yükseklik konumuna bağlı değişimi daha önce anlatılmıştı. Yapılan analizlerde kullanılan akış koşulları yangın dumanının yere dik yönde ideal bir duman mantarı şeklinde oluşup tavandan jet halinde homojen ve izotropik olarak ilerlemeye izin vermemekte, dolayısıyla belli bir süreden sonra yangın konumundaki davranışa ait logaritmik ölçekle verilen CO₂ kütle oranı, sıcaklık ve kütle oranının 0,002 olduğu değerdeki eş değer yüzeyi (iso-surface) ile de görüldüğü gibi yangın kaynağının ve dumanın değerlendirilmesine izin vermez bir hale gelmektedir.



Şekil 5.38: Yangın başlangıcından 280 saniye geçtikten sonra sağdaki yangın kaynağındaki logaritmik CO₂ kütle oranı.



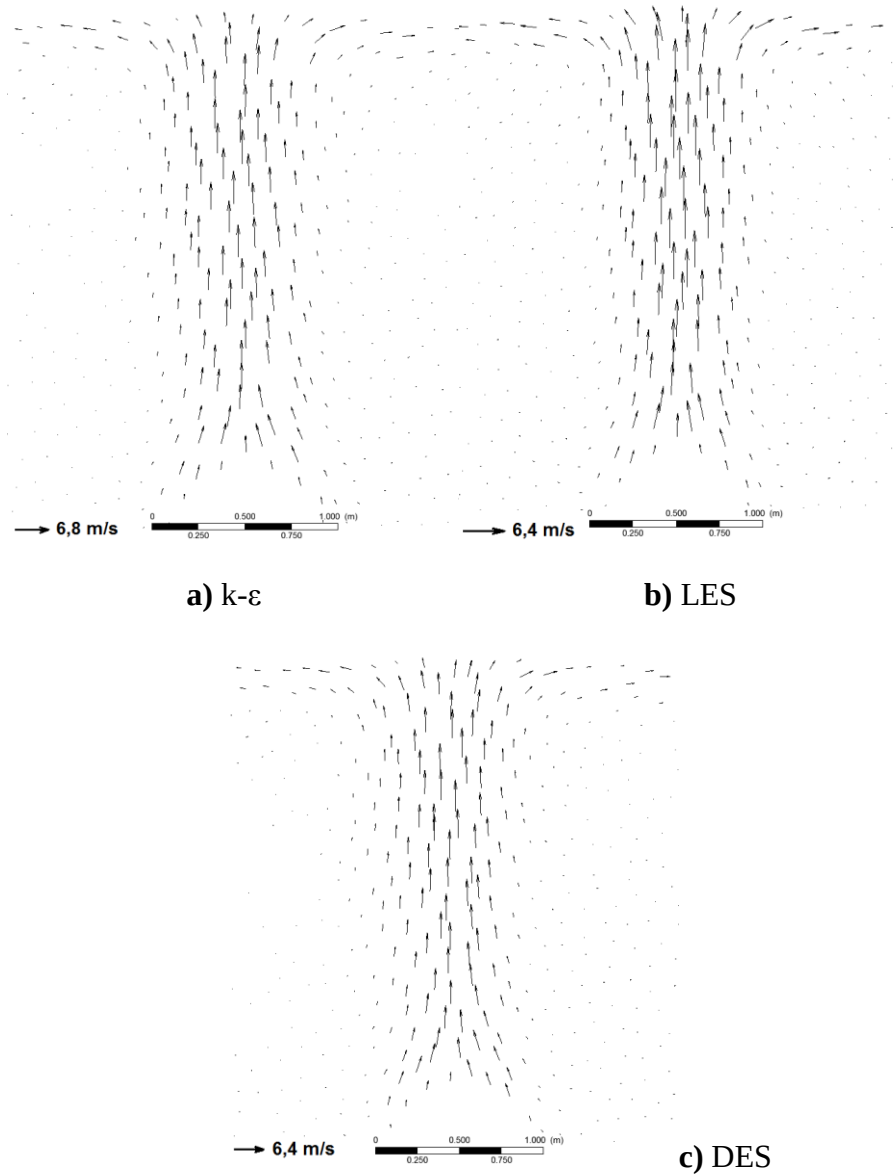
Şekil 5.39: Sağdaki yangın konumunda 280 saniye sonunda 0,002 kütle oranı CO₂ duman eş değer yüzeyi.



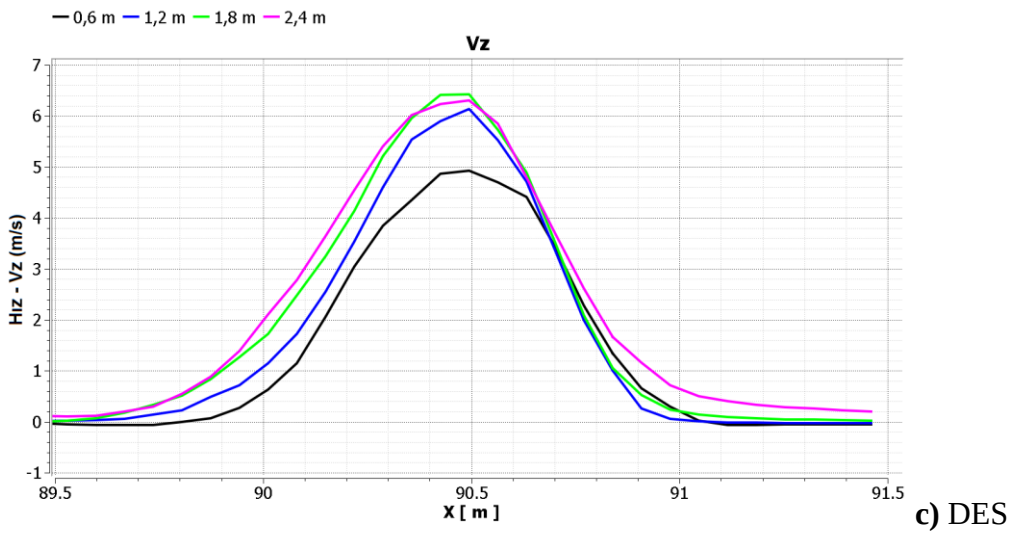
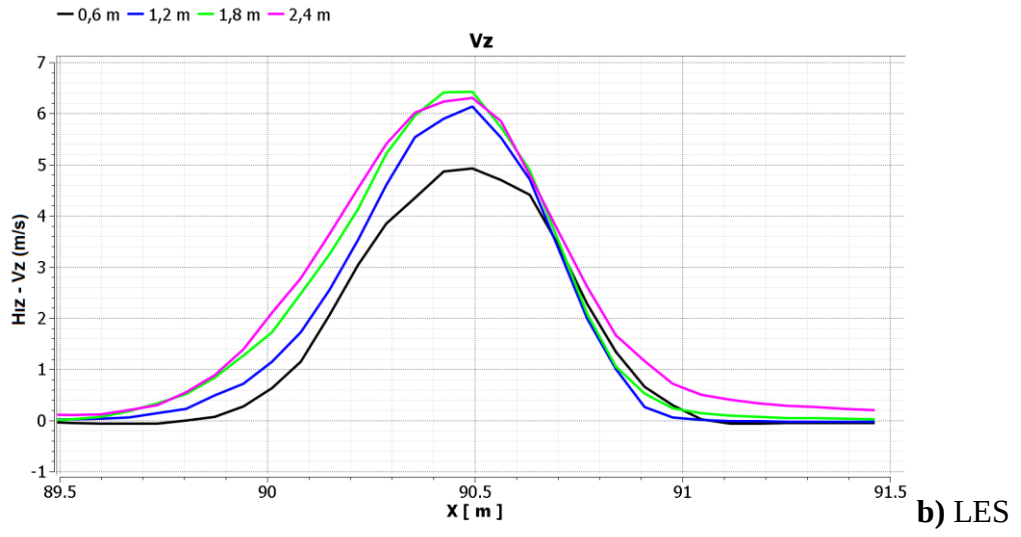
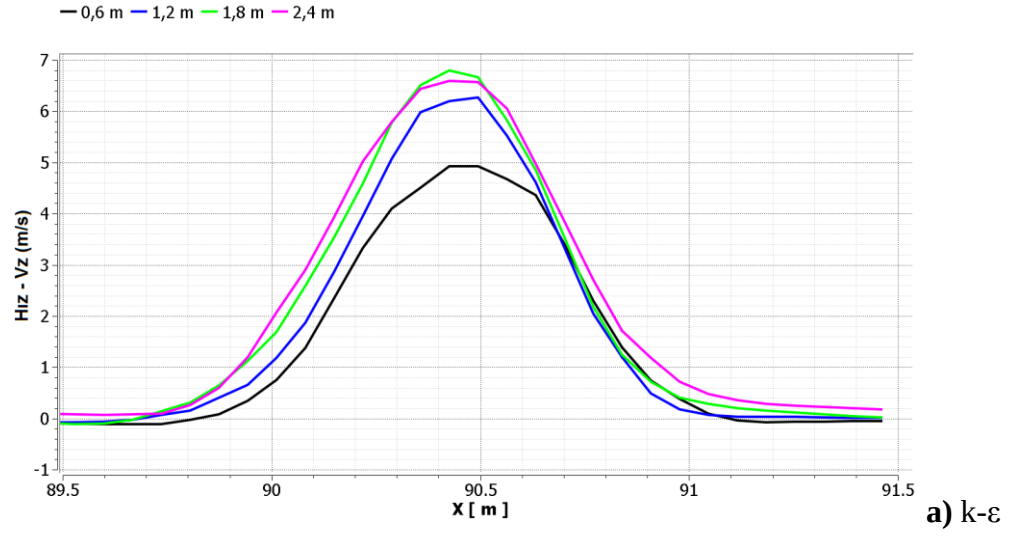
Şekil 5.40: Yangın başlangıcından 280 saniye geçtikten sonra sağdaki yangın kaynağında [°K] cinsinden logaritmik sıcaklık dağılımı.

Bu nedenden ötürü henüz otopark duman tahliye sistemine ait jetfanların devreye girmemiş olduğu ve duman egzoz ve taze hava fanlarının şaftlarda tam devrine henüz ulaşmış olduğu 30 saniye sonundaki yangın kaynağı akışkan davranışları karşılaştırılmıştır. İki yangın kaynağı da birbirine tasarım yangını özellikleri açısından özdeştir. Bu nedenle 30 saniye sonundaki akışkan davranış ve özellikleri yalnızca otopark geometrisine kuşbakışı görünüşe göre sağda bulunan yangın kaynağı için irdelenmiştir.

5.4.3.1 Hız alanlarının karşılaştırılması

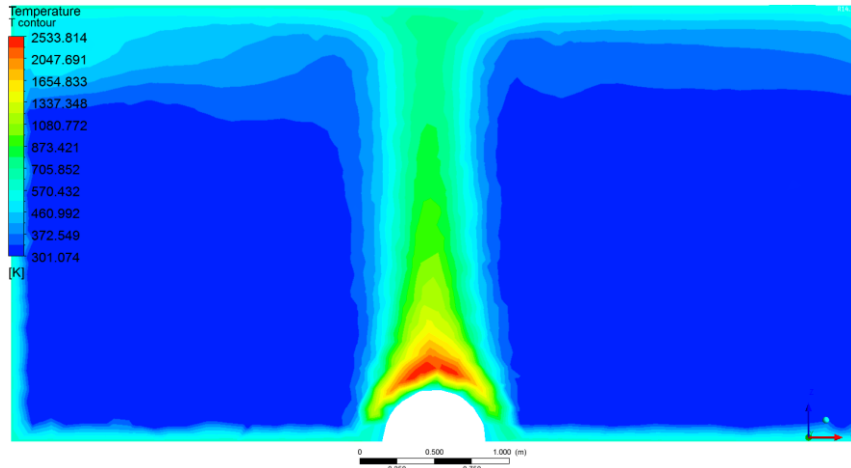


Şekil 5.41: Çalkantı modelleri için 30 saniye sonunda sağdaki yangın kaynağının hız alanı karşılaştırması.

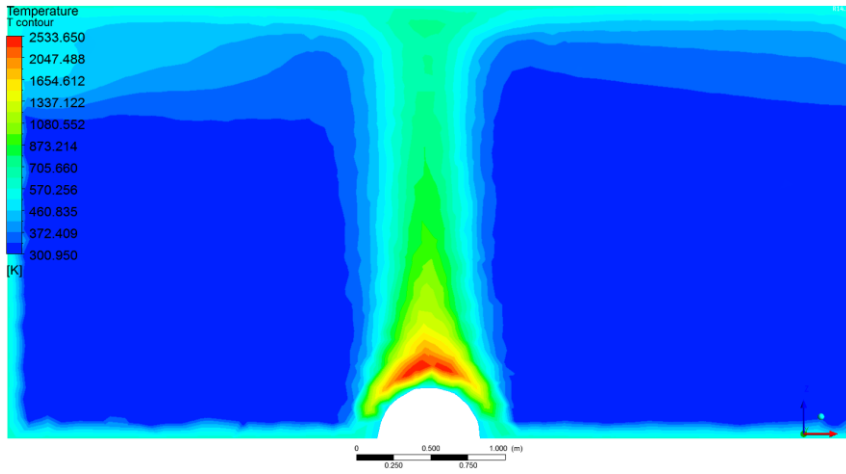


Şekil 5.42: 30 saniye sonunda alev merkezine farklı uzaklıklardaki yükseklikler için V_z hızlarının radyal yönde konuma bağlı karşılaştırması.

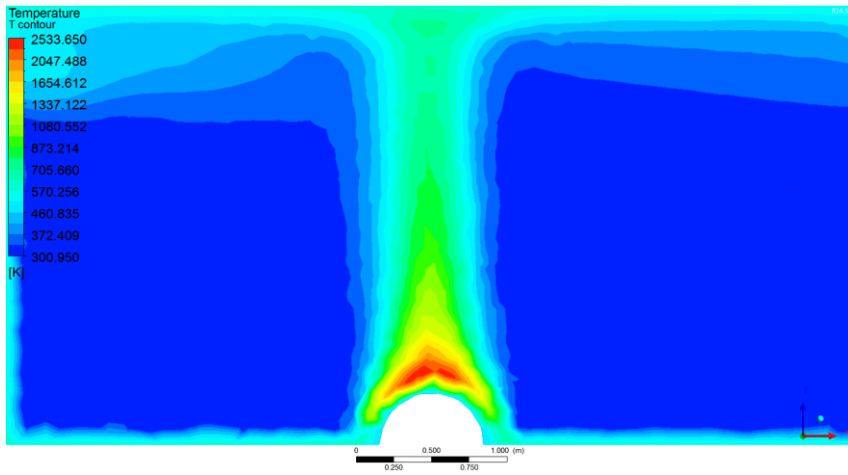
5.4.3.2 Sıcaklıkların karşılaştırılması



a) k-ε

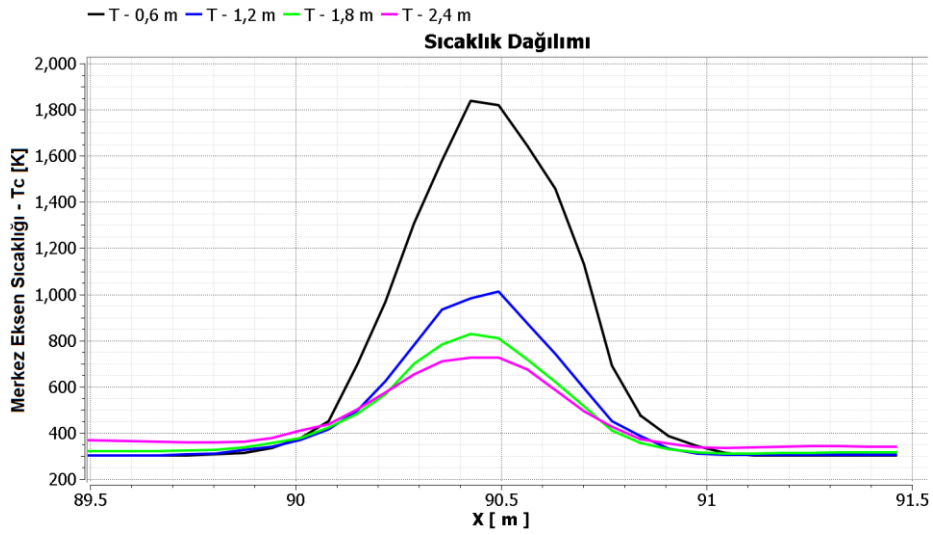


b) LES

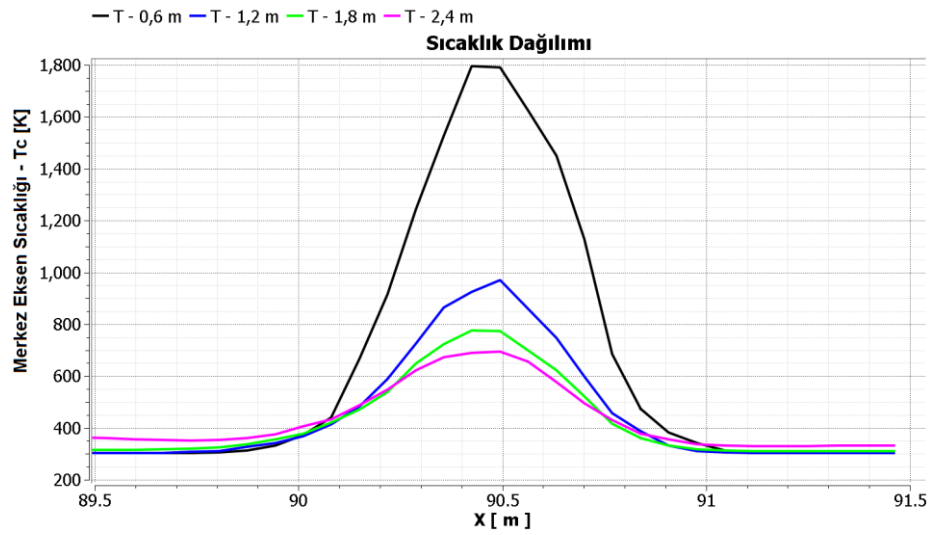


c) DES

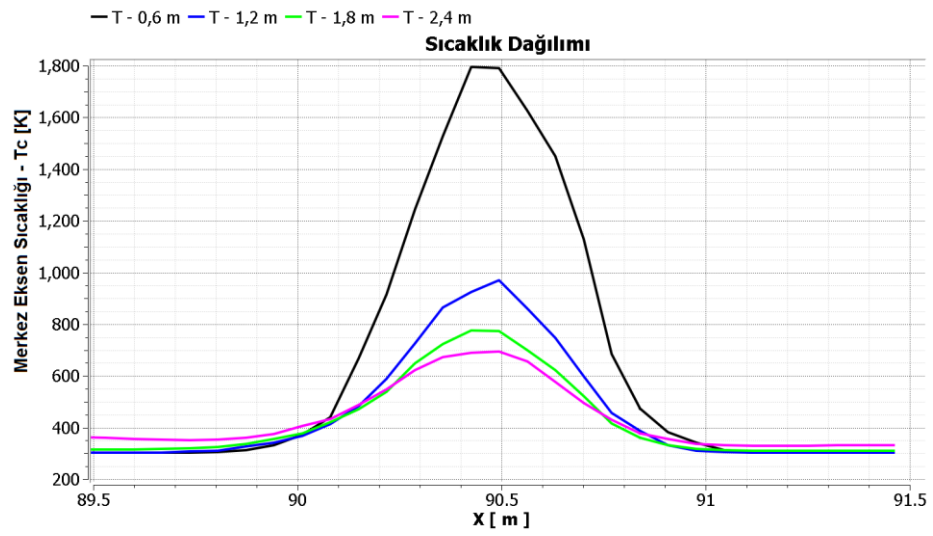
Şekil 5.43: Çalkantı modelleri için 30 saniye sonunda sağdaki yangın kaynağının etrafındaki sıcaklık alanının logaritmik ölçekle karşılaştırılması.



a) k-ε



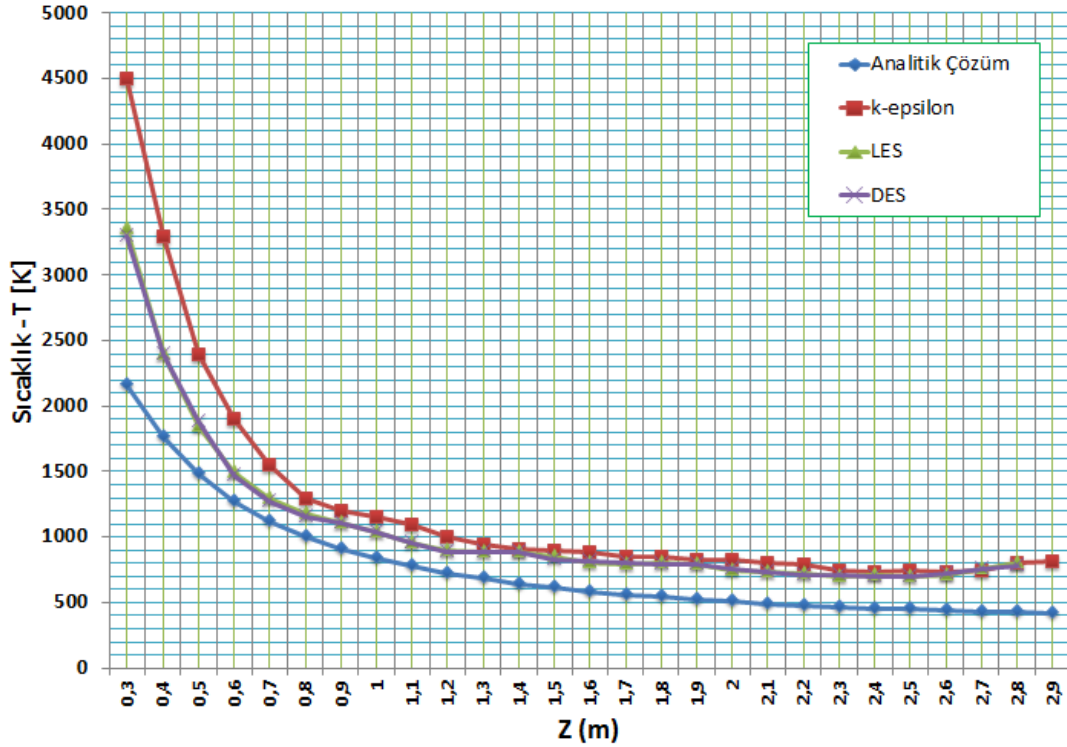
b) LES



c) DES

Şekil 5.44: 30 saniye sonunda alev merkezine farklı uzaklıklardaki yükseklikler için sıcaklıkların radyal yönde konuma bağlı karşılaştırması.

30 saniye sonu itibariyle yangın merkez eksen sıcaklığının analitik çözümü için yangın merkez eksen sıcaklığı ile ilgili denklemler kullanılarak hesap yapılmış ve aşağıdaki grafikte mavi renkli eğri elde edilmiştir. Elde edilen eğri benzetim sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.



Şekil 5.45: Alev merkez eksen sıcaklıklarının beklenen değerleriyle benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.

5.5 Sonuç Yorumları

Bu tez çalışması kapsamında kapalı bir otoparkın 3. bodrum katında ortaya aynı anda çıktığı varsayılan iki binek taşıt yangını kaynaklı olarak ortamda üreyen yangın dumanı ve bu yangın dumanı etkisiyle çevrede oluşan sıcaklık dağılımları irdelenmiştir. Aynı problem koşulları ve aynı sayısal ağ ile k- ϵ , LES ve DES çalkantı modellerinin verdiği sonuçlar incelendiğinde k- ϵ modelinin LES ve DES'e göre çok büyük mertebede olmasa da farklılık içeren davranışta bulunduğu gözlenmiştir.

Hesaplama uzayının görüntüleme noktalarından alınan kütle oranı grafikleri incelendiğinde k- ϵ modeli ile duman yoğunluğunun ulaştığı doruk değer düzeyinin LES ve DES'e oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna ek olarak k- ϵ modeliyle elde edilen sonuçların görüntüleme noktalarındaki kütle oranı-zaman adımı grafiklerinde, k- ϵ modelinin uzun süren salınımlar ortaya çıkardığı da ayrıca

dikkate değerdir. Benzer olarak k- ϵ modelinin verdiği sonuçlarla görüntüleme noktalarından alınan verilerle oluşturulmuş sıcaklık-zaman adımı grafiklerinden k- ϵ modelinin ulaştığı doruk sıcaklığın daha yüksek mertebede olduğu kaydedilmiştir. Yangın duman jeti merkez eksen hızları kıyaslandığında k- ϵ modeli merkez hızları LES ve DES'e göre daha yüksektir. Alınan sonuçların geneli itibariyle LES ve DES neredeyse eşit sonuçlar vermiştir. Duman jeti merkez eksen sıcaklıkları her üç model ve analitik çözüm arasında kıyaslanmış olup üç modelin de analitik çözümle yakın davranış sergilediği söylenebilir ancak sayısal benzetim sonuçları, beklenen sıcaklık dağılımının üstünde değerler vermiştir. Bunun bir nedeni problemde duvarlar için seçilen sınır koşulunun adyabatik duvar olması olabilir. Bütün bu sonuçlara asıl kaynaklık edenin her üç model için de sayısal ağdan bağımsızlık eleman yoğunluğunun belirlenmeden aynı ve kaba bir sayısal ağdan üç model için alınan sonuçların kıyaslanmış olması sayılabilir. Analitik çözüm ile elde edilen merkez eksen sıcaklığı değerine k- ϵ , LES veya DES modeli ile yapılan çözümlerin eleman yoğunluğu arttıkça yaklaşıp yaklaşmayacağının, daha fazla adet ve artan sayısal ağ yoğunluğu değerleriyle tekrarlanan benzetimlerde saptanması gereklidir.

Metan yanma tepkimesinden elde edilmesi beklenen 2210°K 'lık adyabatik alev sıcaklığı değeri, alev yüksekliği içinde bulunduğu düşünülebilecek yerden 0,5 m seviyesi itibariyle yangın duman jeti merkez eksen sıcaklıkları grafiğinde kaba bir sayısal ağ ile elde edilmiştir. Artan sayısal ağ yoğunluğu ile adyabatik alev sıcaklığı değerinin kaynak ile tam çakışması beklenen bir öngörüdür. Yangın kaynağının, tepkimeli olmayan bir benzetimle hesaplama yapılan bu tez çalışması ile kabul edilebilir şekilde modellendiği düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- ANSYS Inc.** (2009). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. 12.0. Pennsylvania.
- Briggs, William L.** *A Multigrid Tutorial*. [dÜ.] Van Emden Henson. s.l., United States : Center for Applied Scientific Computing, Lawrence Livermore National Laboratory, US Department of Energy and University of California. Contract number W-7406-Eng-48.
- British Standards Institution.** (2006). Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks. *British Standard - Components for smoke and heat control systems*. 2006.
- Bunge, U., Mockett, C. ve Thiele, F.** (2007). Guidelines for implementing Detached-Eddy Simulation using different models. *Aerospace Science and Technology*. 1 Şubat 2007, 11, s. 376-385.
- Carlsson, Jörgen.** (1999). *Fire Modelling Using CFD - An Introduction For Fire Safety Engineers*. Lund : Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, 1999. Rap.No. 5025.
- Chow, W. K., Chow, C. L. ve Li, S. S.** (2011). Simulating Smoke Filling in Big Halls by Computational Fluid Dynamics. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2011, Cilt 2011, doi:10.1155/2011/781252.
- Glassman, Irvin ve Yetter, A. Richard.** (2008). *Combustion*. United States : Academic Press, 2008. ISBN: 978-0-12-088573-2.
- Halada, L., Weisenpacher, P. ve Glasa, J.** (2012). Computer Modelling of Automobile Fires. [dÜ.] Chaoqun Liu . *Advances in Modelling of Fluid Dynamics*. s.l. : InTech, 2012, 9, s. 203-228.
- Klote, John H. ve Milke, James A.** (2002). *Principles of Smoke Management*. s.l. : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2002. ISBN 1-883413-99-0.
- Lawrence Berkeley National Laboratory.** *Improving Fan System Performance: A Sourcebook for Industry*. s.l. : U.S. Department of Energy, Air Movement and Control Association International Inc.
- Lönnermark, A. ve Ingason, H.** *Recent Achievements Regarding Heat Release and Temperatures During Fires in Tunnels*. s.l. : SP Swedish National Testing and Research Institute.
- McGrattan, K. B., Baum, H. R. ve Rehm, R. G.** (1998). Large Eddy Simulations of Smoke Movement. *Fire Safety Journal*. 1998, 30, s. 161-178.
- Sezai, I.** (2011). *Simple Method For The Solution of Incompressible Flows on Non-Staggered Grids*. Eastern Mediterranean University, Mechanical Engineering Department. Mersin : s.n., 2011.
- V.D.Giesen, B. J. M., ve diğ.** (2010). Modelling and Simulation of a Jet Fan for Controlled Air Flow In Large Enclosures. *Environmental Modelling & Software*. 22 Temmuz 2010, Cilt 2011, 26, s. 191-200.
- White, Frank M.** (1991). *Viscous Fluid Flow*. s.l. : McGraw-Hill Inc., 1991. ISBN 0-07-069712-4.

- Xin, Y., ve diğ.** (2002). Large Eddy Simulation of Buoyant Turbulent Pool Fires. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2002, Cilt 29, s. 259-266.
- Zhixin, Hu.** (2008). Numerical Simulation of Low-Pressure Explosive Combustion in Compartment Fires. *Dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy*. s.l. : Faculty of Graduate School, University of Maryland, 2008.
- Bakker, André.** (2008). *Computational Fluid Dynamics*. (Çevrimiçi : 3 Şubat 2008). [Alıntı Tarihi : 3 Şubat 2008], <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>.
- Wikipedia - The Free Encyclopedia.** (Çevrimiçi : 12 Şubat 2013). [Alıntı Tarihi: 17 Şubat 2013.] <http://en.wikipedia.org/wiki/CFX>.

EKLER

EK A: Kaba Sayısal Ağ Düzeltme Döngüleri

EK B: Otopark Projesinin 3. Bodrum Katı Teknik Resmi

EK A

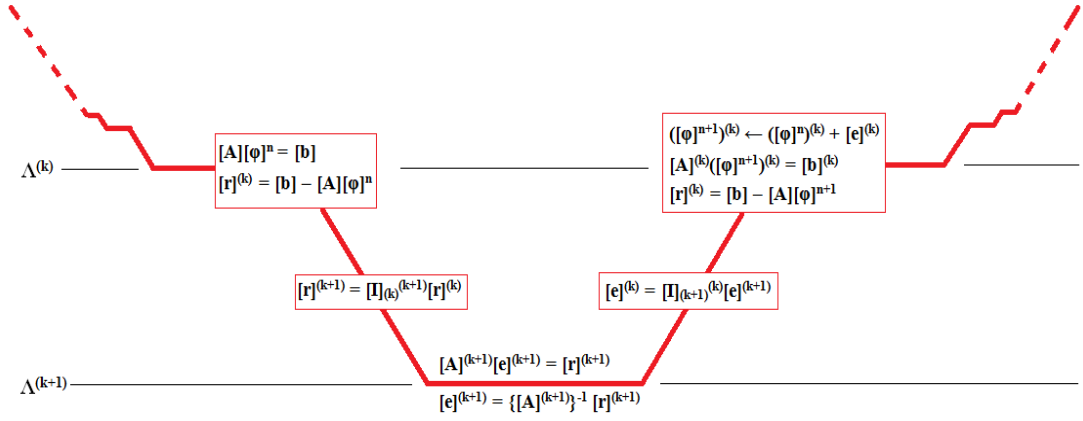
$D_a : [\varphi]^{(1)} \leftarrow ([\varphi]^{(1)}, [b]^{(1)}, a, b)$ düzeltme algoritması:

- $[A]^{(1)}([\varphi]^{(1)}) = [b]^{(1)}$ 'i $\Lambda^{(1)}$ ağ sıklık düzeyinde rastale $([\varphi]^{(1)})$ ilk tahmin vektörüyle çözerek rahat ve kaba ağa ilerle.
- $[r]^{(1)} = [b]^{(1)} - [A]^{(1)}([\varphi]^{(1)})$ rezidüsünü hesapla.
- $[r]^{(2)} = [I]_{(1)}^{(2)}[r]^{(1)}$ $\Lambda^{(2)}$ ağ sıklık düzeyinde rezidü hesapla.
- $[A]^{(2)}[e]^{(2)} = [r]^{(2)}$ $\Lambda^{(2)}$ ağ sıklık düzeyinde $[e]^{(2)}$ için çöz.

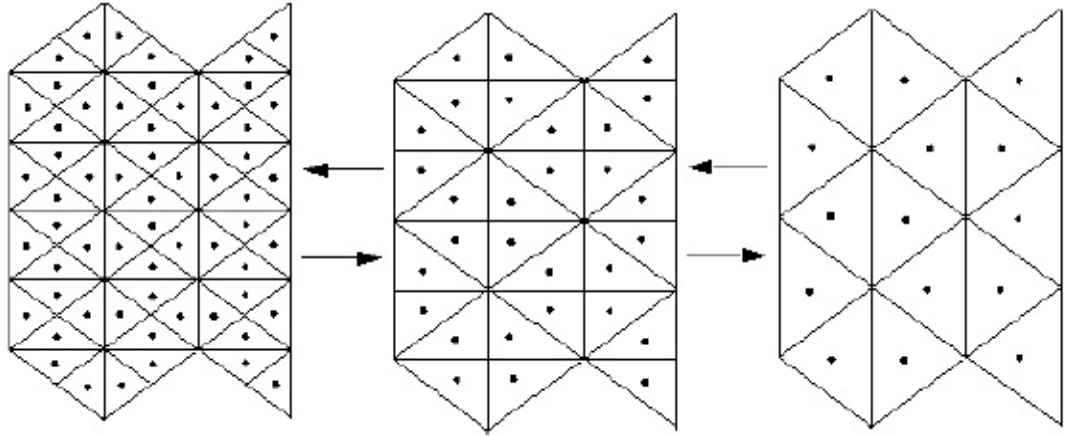
Bu noktada istenirse $([\varphi]^{(n)})^{(2)} \leftarrow ([\varphi]^{(n)})^{(2)} + [e]^{(2)}$ güncellemesi yapılabilir ve $\Lambda^{(2)}$ ağ sıklık seviyesinde algoritmanın bundan önceki dört maddesi yeniden uygulanarak $\Lambda^{(3)}$ ağ sıklık seviyesine ilerlenebilir v.d. şeklinde ilerler. Bu işlem örneğin “b” kere tekrarlanabilir. Geline $\Lambda^{(k)}$ ağ sıklık seviyesinden geri yönlü ve ince ağa doğru ilerleyen düzeltme için:

- *İnce ağ çözüm sonucunu $([\varphi]^{(n+1)})^{(k-1)} \leftarrow ([\varphi]^{(n)})^{(k-1)} + [I]_{(k)}^{(k-1)}[e]^{(k)}$ işlemiyle güncelle.*
- $[A]^{(k-1)}([\varphi]^{(n+1)})^{(k-1)} = [b]^{(k-1)}$ 'i $\Lambda^{(k-1)}$ ağ sıklık düzeyinde $([\varphi]^{(n+1)})^{(k-1)}$ sonuç vektörüyle çöz.
- $[r]^{(k-1)} = [b]^{(k-1)} - [A]^{(k-1)}([\varphi]^{(n+1)})^{(k-1)}$ rezidüsünü hesapla.
- $[A]^{(k-1)}[e]^{(k-1)} = [r]^{(k-1)}$ $\Lambda^{(k-1)}$ ağ sıklık düzeyinde $[e]^{(k-1)}$ için çöz.
- *İnce ağ çözüm sonucunu $([\varphi]^{(n+1)})^{(k-2)} \leftarrow ([\varphi]^{(n+1)})^{(k-2)} + [I]_{(k-1)}^{(k-2)}[e]^{(k-1)}$ işlemiyle güncelle.*

Bu noktada istenirse “a” kere son beş algoritma adımı tekrarlanarak a basamak ince sayısal ağa doğru ilerlenir. $a = b$ koşulu halinde bu döngüye bir V döngüsü denmektedir çünkü sayısal ağ sıklığı geçişleri ve doğrusal denklem sistemlerinin çözümleri bir v harfini andırır. CFX yazılımında ve özelde de yangın benzetimlerinde AMG yönteminde V döngüsü kullanılmıştır.

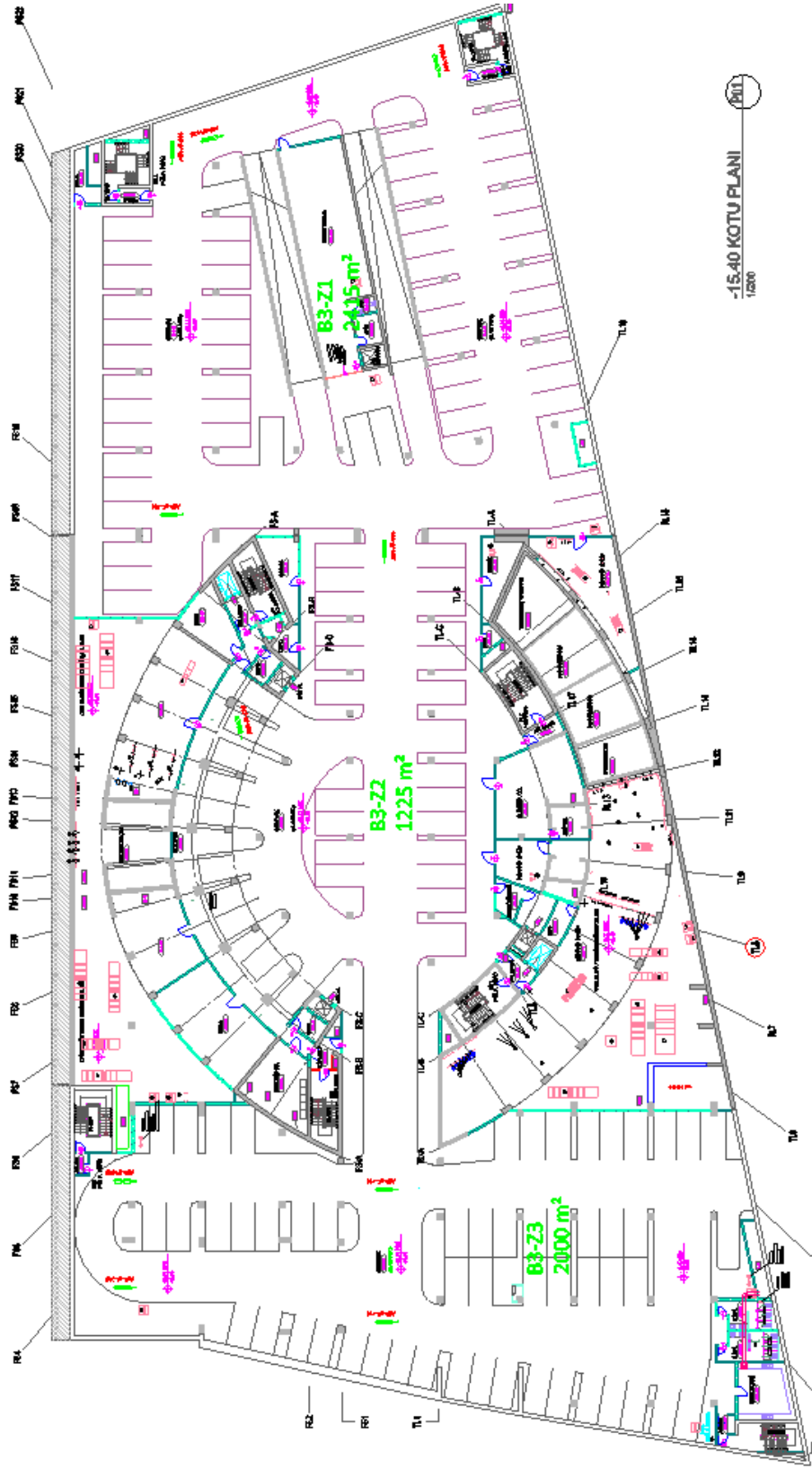


Şekil A.1: AMG şemasında bir kaba sayısal ağ düzeltme döngüsünün uygulanışı, Briggs’den uyarlanmıştır.



Şekil A.2: İnce ağdan kaba ağa ve benzeri ters yönlü geçişlerin şematik gösterimi, ANSYS Inc., (2009)’dan uyarlanmıştır.

EK B



Şekil B.1: Otopark projesine ait 3. Bodrum kat teknik resmi.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Barış ELBÜKEN
Doğum Yeri ve Tarihi: Kadıköy/İstanbul 1983
Adres: Feyzullah Mah. Dilek Sok. Güçyen Sitesi No:1 B/30
Maltepe/İstanbul
E-Posta: bariselbuken@gmail.com
Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi
Fizik, Makine Mühendisliği (Çift Lisans)

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- İTÜ Akışkanlar Grubu (Prof. Dr. Bedii Özdemir – İTÜ Makine Fakültesi)
Harici Araştırmacı, Yüksek Lisans Adayı (Aralık 2010 –)
- AIRONN Havalandırma ve Klima Ltd. Şti.
Ar-Ge Takım Lideri (Haziran 2011 – Haziran 2012)
- TECHNOBEE Ltd. Şti. (Prof. Dr. Attila Dikbaş – İTÜ Mimarlık Fakültesi)
Proje Araştırmacısı ve Raportörü (Şubat 2010 - Ekim 2010)
- İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Yanma Laboratuvarı
(Doç.Dr. Onur Tunçer – İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi)
Proje Asistanı (Şubat 2010 – Temmuz 2010)
- ERAL Makine Ltd. Şti.
Tasarım Mühendisi (Mart 2009 – Şubat 2010)
- ELMAK Elektronik Makine San. Tic. A.Ş.
Tasarım Mühendisi (Ekim 2007 – Aralık 2008)
- MEF Liselerarası Proje Yarışması (Türkiye Finalisti) - 2000
- TÜBİTAK Bilim Adamı Yetiştirme Grubu Bursu (Fizik) -2002
- Türk Fizik Vakfı Prof.Dr.Rauf Nasuhoğlu Bursu - 2002
- TÜBİTAK BİDEB Bursu - 2010
- T.C. K.K.K. Ulş.Per.Okl. ve Eğt.Mrk. Komutanı Tmg. Uğur TARÇIN tarafından verilen “Eğitim ve Atış Birinciliği” Takdiri
- T.C. K.K.K. Ulş.Per.Okl. ve Eğt.Mrk. Komutanlığı Personel Okulu Komutanı Per. Alb. Uğur DEMİRKOL tarafından verilen “Yüksek Disiplin ve Özgüvenli İletişim” konulu takdir.