
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

# BİYOKÜTLE YAKITLI DOLAŞIMLI TİP BİR AKIŞKAN YATAKLI BUHAR KAZANINDA ÇOK FAZLI AKIŞIN VE YANMANIN SAYISAL İNCELENMESİ

**Ahmet KEÇECİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2023**

# ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet KEÇECİ

27/01/2023

# BİYOKÜTLE YAKITLI DOLAŞIMLI TİP BİR AKIŞKAN YATAKLI BUHAR KAZANINDA ÇOK FAZLI AKIŞIN VE YANMANIN SAYISAL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet KEÇECİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

## ÖZET

Bu çalışmada, Marmara Bölgesindeki orman atıklarından türetilmiş biyokütle yakıtlı bir dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile incelenmiştir. MFiX paket programı kullanılarak yapılan çalışmada, Particle-in-Cell (parsel içinde partikül) modeli kullanılmıştır. Dolaşımın, çarpma separatörü olarak çalışan U-kirişler ile sağlandığı yatak için sayısal çözüm sınır şartları, psüdo-yanma sınır şartları ile tanımlanmıştır. Psüdo-yanma modeli için yakıtın özelliklerine bağlı, 850°C için yanma gazı hesapları analitik olarak yapılmıştır. Mevcut hali ile çalışmakta olan buhar kazanının geometrisi kullanılarak gaz-katı hidrodinamik yapı incelenmiştir. İncelenen kazanın gerçek sorunları ve simülasyon sonuçları incelenerek, var olan veya olası problemler tespit edilmiştir. Tespit edilen sorunlar için yapılan öneriler, tekrar sayısal olarak çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda biyokütle yanması için önemli bir yere sahip olan ikincil hava besleme nozullarının akış yönünün su duvarları ve sirkülasyonla ilgili sorunlara yol açtığı görülmüştür. Ortalama gaz hızlarının 8 m/s üstüne nadir çıktığı duvar bölgelerinde, ikincil hava beslemesi sebebiyle gaz hızlarının 10 m/s üzerine çıktığı bölgeler gözlemlenmiştir. Aynı bölgede katı hızlarının da yükselmesi ile su duvarlarının zarar gördüğü ve sirkülasyonun yeterli olmadığı belirlenmiştir. Yatay konumdaki ikincil hava nozullarının 20° aşağı yönlü çevrilmesi ile duvar bölgesindeki gaz ve katı hızlarının düştüğü, katıların yukarı yükseldiği ve dolaşımın daha iyi sağlandığı gözlemlenmiştir. İkincil hava besleme açılarının değiştirilmesi ile katı miktarı yoğun faz bölgesinde küçük bir oranda değişiklik gösterirken (-%3,77), nozullar üstü seyreltik faz bölgesinde daha büyük artış (+%202,69) göstermiştir. Ayrıca yatak içi katı partikül dolaşımını sağlamak için iç duvar eklenerek yapılan çözümün, U-kiriş bölgesindeki partikül birikmesinin sisteme geri dönüş problemini giderdiği görülmüştür. Çözüm süresinin düşürülmesi için yapılan ayrıklaştırma şeması çalışmasında literatürde kullanılan van Leer ve Superbee şemalarının hibrit kompozisyon ile kullanılmasının sadece Superbee'ye kıyasla %55,11, sadece van Leer'e kıyasla %21,03 daha hızlı çözüme ulaştığı belirlenmiştir. Yürütülen çalışmalar ile modelleme maliyeti düşürücü yaklaşımlar kullanılarak endüstriyel ölçekli bir buhar kazanının modellenmesi için MFiX-PIC kullanımının uygun olduğu anlaşılmıştır.

Bilim Kodu : 91411
Anahtar Kelimeler: : Biyokütle, Buhar kazanı, Dolaşımlı akışkan yatak, HAD, PIC
Sayfa Adedi : 113
Danışman : Prof. Dr. Hüseyin TOPAL

# NUMERICAL INVESTIGATION OF MULTIPHASE FLOW AND COMBUSTION IN A BIOMASS FUELLED CIRCULATING FLUIDIZED BED STEAM BOILER

(M. Sc. Thesis)

Ahmet KEÇECİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

## ABSTRACT

In this study, a circulating fluidized bed steam boiler with biomass fuel derived from forest wastes in the Marmara Region was investigated by the computational fluid dynamics method. Particle-in-Cell method was used in the study using the MFiX software. The boundary conditions of the numerical solution for the bed, in which the circulation is provided by the u-beams working as the impact separator, are defined by the pseudo-combustion boundary conditions. For the pseudo-combustion model, the combustion gas calculations were made analytically for 850°C, depending on the characteristics of the fuel. The gas-solid hydrodynamic structure was investigated by using the geometry of the steam boiler operating in its current state. Existing or potential problems were determined by examining the real problems and simulation results of the investigated boiler. The suggestions for the identified problems were solved numerically again and the results were compared. As a result of the investigations, it has been seen that the flow direction of the secondary air supply nozzles, which have a crucial point for biomass combustion, causes problems with water walls and circulation. In the wall regions where the average gas velocities rarely exceed 8 m/s, the gas velocities exceed 10 m/s due to the secondary air supply, were observed. It was determined that the water walls were damaged and the circulation was not sufficient with the increase in solid velocities in the same region. It has been observed that the gas and solid velocities in the wall region decrease, the solids rise upwards and the circulation is provided better by turning the horizontally positioned secondary air nozzles downwards by 20°. By changing the secondary air supply angles, the number of solids showed a slight change (-3.77%) in the dilute phase region, while it increased more (+202.69%) in the upper nozzle dense phase region. In addition, it has been observed that the solution made by placing an inner wall to ensure the circulation of solid particles in the bed eliminates the problem of particle accumulation in the U-beam area that returns to the system. In the spatial discretization scheme study conducted to reduce the solution time, it was determined that the use of van Leer and Superbee schemes used in the literature with hybrid composition reached 55.11% faster result compared to Superbee alone, and 21.03% faster than only van Leer. It has been evaluated that the use of MFiX-PIC is appropriate for modelling an industrial-scale steam boiler by using modelling cost-reducing approaches with the studies understood.

Science Code : 91411
Key Words : Biomass, Steam boiler, Circulating fluidized bed, CFD, PIC
Page Number : 113
Supervisor : Prof. Dr. Hüseyin TOPAL

# TEŞEKKÜR

Lisans öğrenimimden itibaren çevre, yenilenebilir enerji, buhar kazanları, yakıtlar gibi konularda bilgi birikimimi artırmak için yardımcı olmaktan çekinmeyen; bu ve benzeri konularla birlikte akademik çalışma motivasyonumu da artıran; bir öğretmenden daha fazlası olan tez danışmanım Prof. Dr. Hüseyin TOPAL'a teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım. Doğduğum günden itibaren her konuda en büyük destekçim, ne olursa olsun yanımda olan babam Hüseyin KEÇECİ, annem Aysun KEÇECİ ve canım kardeşim Ayşe KEÇECİ'ye sınırsız sevgileri ve üzerimdeki emekleri için sonsuz teşekkür ederim. Literatüre yoğunlaştığım ve çalışmam ile ilgili modeli oluşturmaya çalıştığım, zaten zor olan pandemi döneminin zorluklarını manevi olarak azaltan; sevgisini her zaman hissettiğim canım eşim Ecem ORUÇ KEÇECİ'ye çok teşekkür ederim. Tanıdığım en değerli eğitimcilerden, ne yazık ki şu an aramızda olmayan dedem Ahmet İSFENDİYAR'a ve küçüklüğümden itibaren ailemle birlikte, olduğum kişi olmamda emeği olan tüm yakınlarıma saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Neredeyse tüm yüksek lisans tez sürecinde zamanımın büyük çoğunluğunu beraber geçirdiğimiz iş arkadaşlarıma manevi destekleri için teşekkür ederim.

Ahmet KEÇECİ

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET ..... iv

ABSTRACT ..... v

TEŞEKKÜR ..... vi

İÇİNDEKİLER ..... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ..... ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... x

RESİMLERİN LİSTESİ ..... xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... xv

1. GİRİŞ ..... 1

2. LİTERATÜR ..... 5

3. AKIŞKAN YATAKLI KAZANLARDA BİYOKÜTLE YANMASI ..... 23

3.1. Biyokütle ..... 23

3.1.1. Biyokütle kaynakları ..... 23

3.1.2. Biyokütle yakıtlarının önemli avantajları ve dezavantajları ..... 24

3.1.3. Biyokütle yanması ..... 24

3.2. Akışkan Yatakta Yanma ..... 25

3.2.1. Yanma hesaplamaları ..... 25

3.2.2. Akışkan yatak hidrodinamiği ..... 28

3.3. Çok Fazlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ..... 34

3.3.1. Hücre içinde partikül (PIC) modeli ..... 35

3.3.2. Ayrıklaştırma ..... 38

**Sayfa**

4. BİYOKÜTLE YAKITLI BİR DAY BUHAR KAZANI YANMA ODASI ANALİZİ VE MFIX-PIC İLE TASARIM İYİLEŞTİRMESİ ..... 43

4.1. Dolaşımlı Akışkan Yataklı Buhar Kazanı Yanma Odası Analizi ..... 44

4.1.1. Yanma hesapları ..... 45

4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Soğuk Model Analizi ..... 48

4.2.1. Modelin oluşturulması ..... 53

4.2.2. Hücre sayısından bağımsızlık çalışması ..... 60

4.2.3. İstatistiksel ağırlığın model çözümüne etkisi ..... 65

4.2.4. Mevcut tasarımın sayısal çözümleri ve tespit edilen problemler ..... 69

4.3. Mevcut Tasarımda Bulunan veya Öngörülen Problemler İçin İyileştirme Önerileri ..... 74

4.3.1. İyileştirme önerisi I (nozul yerleşiminin değiştirilmesi) ..... 75

4.3.2. İyileştirme önerisi II (ayırıcı iç duvar eklenmesi) ..... 86

4.3.3. Mevcut tasarım ve iyileştirme önerilerinin karşılaştırılması ..... 93

4.4. Ayrıklaştırma (Diskritizasyon) Şemalarının Maliyet (Çözüm Süresi) Etkisi ..... 98

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 103

KAYNAKLAR ..... 107

ÖZGEÇMİŞ ..... 113

# ÇİZELGELERİN LİSTESİ

**Çizelge** **Sayfa**

Çizelge 3.1. Biyokütle türleri ve kaynakları ..... 24

Çizelge 3.2. Çeşitli separatör tiplerinin çalışma performansları ..... 30

Çizelge 3.3. Çeşitli araştırmacıların bulmuş olduğu $K_1$ ve $K_2$ sabitleri ..... 31

Çizelge 3.4. Ayrıklaştırma şemalarının formülasyonu için down wind faktörleri ..... 42

Çizelge 4.1. Odun cipsi elementer analizi ve kaba analizi ..... 46

Çizelge 4.2. Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanının su bölümleri için belirlenmiş sıcaklık ve basınç değerlerine bağlı olarak entalpi değerleri ..... 46

Çizelge 4.3. Yanma sonucu ortaya çıkan baca gazlarının analitik hesaplamaları ..... 48

Çizelge 4.4. Sayısal çözümü yapılacak modelin gaz fazı ve PIC parametreleri ..... 57

Çizelge 4.5. Sayısal çözümü yapılacak modelin başlangıç ve sınır şartları ..... 58

Çizelge 4.6. Sayısal çözümde her bir parametre için uygulanacak boyutsal ayrıklaştırma şemaları ve gevşeme faktörleri ..... 59

Çizelge 4.7. Sayısal çözümü yapılacak modelin nümerik ve çözüm kontrol değerleri . 60

Çizelge 4.8. Akışkan yatak HAD çalışmalarının hücre sayısı ve hacimleri ..... 61

Çizelge 4.9. Mevcut durum ve iyileştirme önerisi I, üç farklı yüzeydeki karşılaştırmalı ortalama partikül kütleleri ..... 84

Çizelge 4.10. Yatak tabanından itibaren farklı H yükseklikleri için karşılaştırmalı ortalama partikül hacim kesirleri ..... 85

Çizelge 4.11. Üç farklı tasarım sonuçları için üç farklı yüzeydeki karşılaştırmalı ortalama partikül kütleleri ..... 93

Çizelge 4.12. Üç farklı tasarım için yatak tabanından itibaren farklı H yüksekliklerinde karşılaştırmalı ortalama partikül hacim kesirleri ..... 94

Çizelge 4.13. Ayrıklaştırma şemaları karşılaştırması için yapılan çözümlerdeki ayrıklaştırma şemaları seçimi ..... 98

Çizelge 4.14. Kullanılan dört farklı şema için yakınsamama sayısı, ortalama zaman adımı ve CPU kullanım karşılaştırması ..... 101

# ŞEKİLLERİN LİSTESİ

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 2.1. Tavuk çiftliği altlığı yakıtlı kabarcıklı akışkan yataklı buhar kazanına sahip bir elektrik santralinin genel şeması ..... 6

Şekil 2.2. ATY (RDF) yakıtlı buhar kazanının katı modeli ..... 7

Şekil 2.3. Vorteksli akışkan yataklı yakıcı ..... 8

Şekil 2.4. İç dolaşımlı akışkan yataklı bir buhar kazanının şeması ..... 8

Şekil 2.5. Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanının dönüş bölgesi için tasarımlar .... 9

Şekil 2.6. Simülasyon ve deneysel sonuçların siklon çıkışında baca gazları cinsinden karşılaştırması ..... 11

Şekil 2.7. Baca gazının yatak çalışma parametrelerine göre değişimi; a) yatak sıcaklığına bağlı değişimi b) birincil hava oranına bağlı değişimi..... 12

Şekil 2.8. İkincil hava hızının değişimiyle, hava yakıt oranındaki (HYO) değişimin yataktaki katı hızlarına etkisini gösteren katı hız konturları ..... 13

Şekil 2.9. t=30 s anında yatak yüksekliğine bağlı heterojen ve homojen reaksiyonların hızları..... 14

Şekil 2.10. Geldart A ve Geldart B partikülleri ile doldurulmuş iki farklı dolaşımlı akışkan yatağın farklı sürükleme modelleri ile yüksekliğe bağlı boşluk kesri karşılaştırması. a) Geldart A partikülü kullanılan yatak b) Geldart B partikülü kullanılan yatak ..... 16

Şekil 2.11. Farklı yatak yüksekliklerindeki zaman-ortalamalı partikül hızları ve hacim kesirleri; a) partikül hacim kesri b) partikül hızı ..... 20

Şekil 3.1. Akışkan hızına bağlı olarak farklı akışkanlaşma rejimleri ..... 29

Şekil 3.2. Partiküllerin akış içinde düşüş yapacağı terminal hız hesaplaması için diyagram..... 33

Şekil 3.3. Farklı parçacık boyutu ve yatak hızına bağlı olarak akışkanlaşma rejiminin belirlenmesi için Kunii ve Levenspiel tarafından türetilmiş diyagram ..... 34

Şekil 3.4. PIC modelinde, partikül ve parsel konsepti. a) partiküllerle doldurulmuş bir hücre b) her bir partikül türüne istatiksel ağırlık uygulandıktan sonra aynı hücre ..... 36

Şekil 3.5. Kontrol hacmi ve x-yönlü düğüm noktaları ..... 38

Şekil 3.6. Akış yönüne bağlı olarak belirlenmiş düğümlerin konumu ..... 41

Şekil 4.1. Tez çalışması için yapılan tasarım ve sayısal analiz adımları ..... 44

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 4.2. Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı yanma odası tasarım adımları..... 45

Şekil 4.3. MFiX paket programı ana menü örnek ekran görüntüsü..... 49

Şekil 4.4. Biyokütle yakıtlı dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı ön ve yan görünüş CAD geometrisi..... 54

Şekil 4.5. Sınır şartları için iç yüzey ve nokta kaynak olarak belirlenmiş bölgelerin gösterimi (a) akışkan yatak genel görünüş (b) dolaşımı sağlayan iç duvar (c) u-kirişler (d) ikincil hava nozulları (e) u-kiriş yerleşimi ..... 55

Şekil 4.6. Yatak malzemesi (kum) partikül çap dağılımı..... 57

Şekil 4.7. Tüm akış bölgesi için hücrelerin belirlenmesi ve sınır şartlarının oluşturulması ..... 61

Şekil 4.8. H = 1 m'de her bir hücre sayısı için zamana bağlı ortalama gaz basıncı değerleri..... 62

Şekil 4.9. H = 1 m'de her bir hücre sayısı için zamana bağlı ortalama gaz hızı değerleri..... 62

Şekil 4.10. Farklı hücre sayısı yapılarında eksenel basınç profilleri ..... 63

Şekil 4.11. Farklı hücre sayısı ile çözümlerde zaman ortalamalı boşluk kesri grafiği .. 64

Şekil 4.12. H = 1 m ve H = 10 m için ortalama (a) gaz basınçları ve (b) gaz hızları .... 64

Şekil 4.13. Zaman ortalamalı gaz hız konturlarının yatak simetri eksenlerinden alınmış ön ve sol görünüşleri ..... 65

Şekil 4.14. H = 0,5 m yükseklikte istatistiksel ağırlığa bağlı olarak x doğrultusundaki katı hacim kesirleri..... 66

Şekil 4.15. H = 0,5 m yükseklikte istatistiksel ağırlığa bağlı olarak ortalama katı hacim kesirleri..... 67

Şekil 4.16. Farklı yüksekliklerde ve dönüş bölgesindeki istatistiksel ağırlığa bağlı ortalama katı kütleleri ..... 68

Şekil 4.17. Mevcut çalışma ve Gu vd.[57] yükseklik-partikül hacim kesri karşılaştırması ..... 69

Şekil 4.18. Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı duvarlarındaki zaman-ortalamalı gaz hızı değerleri (her bir hız konturu için sol alt köşesinde eksen verilmiştir.)..... 70

Şekil 4.19. Ön görünüş simetri ekseninden alınmış kesitteki gaz hız konturları..... 71

Şekil 4.20. H=7 m yüksekliği için zaman ortalamalı gaz hız konturu..... 71

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 4.21. Farklı zaman adımları için anlık partikül dağılımı (a) xy-ekseni görüntüsü için $V_x$ partikül hızları (b) yz-ekseni için $V_z$ partikül hızları ..... 72

Şekil 4.22. Dönüş bölgesi için partiküllerin farklı zaman adımlarındaki y doğrultusundaki $V_y$ partikül hızları (görüntü H = 11,5 m ve H = 18,5 m aralığında alınmıştır.) ..... 73

Şekil 4.23. Dönüş bölgesi duvarının gösterimi ve hareketli/hareketsiz partiküllerin hızları ..... 74

Şekil 4.24. H = 4 m – H = 6.2 m aralığında ana yataktaki partiküllerin x yönlü (Vx) hızları ..... 76

Şekil 4.25. H = 4 m – H = 6.2 m aralığında ana yataktaki partiküllerin z yönlü (Vz) hızları ..... 77

Şekil 4.26. Dikey açılı nozul yerleşimi için akışkan yataklı buhar kazanı zaman ortalamalı duvar hız konturları ..... 79

Şekil 4.27. Dikey açılı nozul yerleşimi için merkez simetri kesiti zaman ortalamalı gaz hız konturları (a) ön görünüş (xy) (b) sol görünüş (zy) ..... 80

Şekil 4.28. Dikey açılı nozul yerleşimi için ön görünüş merkez simetri ekseni farklı zaman adımlarındaki gaz hız konturları ..... 81

Şekil 4.29. Dikey açılı nozul yerleşimi için farklı zaman adımlarında anlık partikül dağılımı (a) xy-ekseni görüntüsü için Vx partikül hızları (b) yz-ekseni için Vz partikül hızları ..... 81

Şekil 4.30. Dikey açılı nozul yerleşimi için farklı zaman adımlarında eksenel (y-yönlü) partikül hız dağılımları ..... 82

Şekil 4.31. Dikey açılı nozul yerleşimi için H = 2 m – H = 6.2 m aralığında ana yataktaki partiküllerin x yönlü (Vx) hızları ..... 83

Şekil 4.32. H = 4,5 m - H = 15 m aralığındaki partiküllerin anlık dağılımları ve hız profilleri (t = 25 s.) (a) mevcut durum (b) iyileştirme önerisi I..... 84

Şekil 4.33. Tasarım iyileştirme önerisi I'in dönüş bölgesindeki partikül dolaşımına etkisi (a) mevcut durum (b) iyileştirme önerisi I..... 86

Şekil 4.34. İyileştirme Önerisi II için iç yüzeylerin yerleşimi (a) ön görünüş (b) izometrik görünüş..... 87

Şekil 4.35. İyileştirme önerisi II için akışkan yataklı buhar kazanı zaman ortalamalı duvar hız konturları ..... 88

Şekil 4.36. İyileştirme önerisi II için merkez simetri kesiti zaman ortalamalı gaz hız konturları (a) ön görünüş (xy) (b) sol görünüş (zy)..... 89

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 4.37. İyileştirme önerisi II için ön görünüş merkez simetri ekseni farklı zaman adımlarındaki gaz hız konturları..... 89

Şekil 4.38. İyileştirme önerisi II için farklı zaman adımlarında anlık partikül dağılımı (a) xy-ekseni görüntüsü için Vx partikül hızları (b) yz-ekseni için Vz partikül hızları ..... 90

Şekil 4.39. İyileştirme önerisi II için H = 2 m – H = 6,2 m aralığında ana yataktaki partiküllerin x yönlü (Vx) hızları ..... 91

Şekil 4.40. İyileştirme önerisi II için farklı zaman adımlarında eksenel (y-yönlü) partikül hız dağılımları ..... 92

Şekil 4.41. İyileştirme önerisi II için akışkan yatağın farklı bölgelerinde partiküllerin x-yönlü ($V_x$) hızları (a) yükselme bölgesi (b) dönüş bölgesi ..... 92

Şekil 4.42. XY merkez simetri ekseninde farklı yükseklikler için x yönlü partikül katı hacim kesitleri H = a)0,5 m b)1,5 m c)2,5 m d)4,5 m e)7 m f)10 m .... 95

Şekil 4.43. ZY merkez simetri ekseninde farklı yükseklikler için z yönlü partikül katı hacim kesitleri H = a)0,5 m b)1,5 m c)2,5 m d)4,5 m e)7 m f)10 m ..... 97

Şekil 4.44. Her bir ayrıklaştırma şeması için zamana bağlı çözüm zaman adımları ..... 99

Şekil 4.45. Ayrıklaştırma şemaları çözümlerinin zaman adımları grafiklerinin toplu olarak karşılaştırılması..... 100

# RESİMLERİN LİSTESİ

**Resim** **Sayfa**

Resim 4.1. Orman atıklarından üretilmiş biyokütle; ağaç kökleri ve diğer atıklar (solda), parçalanmış ve yakmaya hazır hale getirilmiş odun cipsleri (sağda) ..... 43

Resim 4.2. Akışkan yatak içi fotoğrafı ikincil hava nozulları (solda), yatak altı birincil hava nozulları (sağda) ..... 56

Resim 4.3. Hasar almış ve önlem amaçlı zırh eklenmiş su boruları ..... 78

# SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| **Simgeler** | **Açıklama** |
|---|---|
| $\varepsilon_g$ | Boşluk kesri |
| $\varepsilon_s$ | Partikül hacim kesri |
| $\rho$ | Yoğunluk ($kg/m^3$) |
| $\sigma$ | Stres tensörü |
| $\Delta P$ | Basınç kaybı |
| **Ar** | Arşimet sayısı |
| $d_p$ | Partikül çapı (m veya μm) |
| $H_u$ | Alt ısıl değer |
| $H_o$ | Üst ısıl değer |
| **P** | Basınç (Pa) |
| **T** | Sıcaklık (°C veya K) |
| $U_g$ | Gaz hızı (m/s) |
| $U_{mf}$ | Minimum akışkanlaşma hızı |
| $V_G$ | Gaz debisi |
| $W_p$ | İstatistiksel ağırlık (partikül sayısı/parsel) |

| **Kısaltmalar** | **Açıklama** |
|---|---|
| **ATY** | Atıktan Türetilmiş Yakıt |
| **CFL** | Courant-Friedrichs-Lewy |
| **HAD** | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| **LHV** | Alt Isıl Değer |
| **PIC** | Particle in Cell (Parsel içinde Partikül) |

# 1. GİRİŞ

Sanayileşme ve teknolojik gelişmelerdeki artış, enerjiye duyulan talebi dünya genelinde yıldan yıla artırmaktadır. Buhar makinelerinin icadı ve ardından elektriğe olan talebin yükselmesi, nüfusun da hızlı artışıyla fosil yakıtların kullanımını aşırı miktarda artırmıştır. Fosil yakıtlardaki bu yükseliş trendi, atmosfer gazlarının dengesinde bozulmalara yol açmıştır. Milyonlarca yıl boyunca yer altında biriken karbon kaynaklarının özellikle son yüzyılda hızlıca atmosfere salınması, atmosfer karbon dengesini olumsuz yönde değiştirmiştir. Karbon dengesinin bozulmasının yanı sıra, sera gazı olarak adlandırılan karbondioksit ($CO_2$), metan ($CH_4$), su buharı ($H_2O$), kloroflorokarbonlar (CFC) ve hidroflorokarbonlar (HFC) vb. gazların atmosferde birikmesi sera etkisi yaratarak dünyanın ortalama sıcaklığını yükseltmiştir. Ortalama sıcaklıkların yükselmesi, küresel ısınma ve iklim krizi gibi belirgin sonuçlarla etkisini göstermeye devam etmektedir.

Fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılabilecek enerji kaynaklarının başında yenilenebilir enerji kaynakları adı altında toplanmış enerji kaynakları gelmektedir. Biyokütle, jeotermal, rüzgar, güneş gibi doğada var olan ve zararlı etkileri fosil yakıtlara kıyasla daha az olan enerji kaynaklarından enerji üretimi gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

Her bir yenilenebilir enerji kaynağının, kaynak özellikleri ve üretim tekniklerine bağlı olarak avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından farklı olarak biyokütlelerin ayrı bir başlık altında incelenmesi çevre ve teknolojik gelişimi açısından da önem arz etmektedir. Fosil yakıtların sebep olduğu karbon dengesizliğinin aksine biyokütleler, yaşam döngüsünün kısa olması sebebiyle dengesizliğe yol açmamaktadır. Ayrıca bitkisel kaynaklı biyokütleler fotosentez ile oksijen ürettiğinden, enerji üretimi için kullanılacağı zamana kadar bulunduğu ekosisteme faydaları da olmaktadır.

Fosil yakıtlarının kullanımından doğan sonuçların kontrol altına alınması, azaltılması ve engellenmesi için Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Avrupa Birliği gibi kurumlar başta olmak üzere çeşitli resmi kurumlar, sanayi kuruluşları, üniversiteler ve enstitüler farklı çalışmalar yürütmektedir.

Katı biyokütleler ve atıklar, enerji üretimi teknolojileri bakımından katı fosil yakıtlara benzemektedir. Ancak biyokütlelerin çeşidi çok olmasına rağmen ortak özellikleri, fosil yakıtlara kıyasla uçucu karbon oranı ve nem oranlarının yüksek olmasıdır. Bu farklar, özellikle yakma tekniklerinde çeşitli geliştirme ve düzenleme ihtiyacı doğurmaktadır. Sabit yataklı veya akışkan yataklı buhar kazanları, katı yakıttan elektrik üretimi için en çok kullanılan yöntemlerdir. Yüksek verimleri ve yakıt çeşitliliğine uygunluklarıyla akışkan yataklı buhar kazanları, en çok tercih edilen kazanlar olmaktadır.

Ülkemiz ve Avrupa Birliği'nin çeşitli özendirmeleri, teşvikleri ile biyokütle yakıtlı akışkan yataklı buhar kazanlarının sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Düşük ısıl değerli atıkların bertarafı ve yakıtlardan enerji eldesi için kullanılabilir olduğundan, bölgesel ekonomiye katkıları azımsanmayacak miktarlarda olabilmektedir. Ayrıca fosil yakıtlar konusunda dışa bağımlılığı azaltması açısından biyokütle kaynakları önem arz etmektedir.

Akışkan yataklı buhar kazanlarının biyokütle yakıtları için kullanımı tarihi açıdan kısmen yeni sayılabileceğinden literatürdeki ve sanayi odaklı çalışmaların artması, kullanılabilirlik ve yaygınlık açısından önemlidir.

Endüstriyel ölçekli kazanların çalışma şartlarını, çalışmaları sırasında gözlemlemek deneysel sistemlere kıyasla oldukça zordur. Ayrıca çalışmakta olan bir akışkan yataklı buhar kazanı için yapılacak her tasarım değişikliği; durdurma-başlatma maliyeti, tasarım değişikliği sonrası kontrol-yeniden tasarım çalışmaları gibi ek (ve yüksek) maliyetlere sebep olacaktır. Bu sebeple yaşanan bir sorunun kaynağının tespiti ve yapılabilecek değişikliklerin sonuçlarının öngörülebilmesi için modelleme çalışmaları yapmak kurulum maliyeti, çalışma kaybı ve süre gibi birçok ek maliyetin önüne geçecektir. Termodinamik denge yaklaşımı ile yapılan modelleme çalışmaları giriş ve çıkış parametrelerini kontrol etmek için bir fikir verse de bölgesel problemlere çözüm sunmamaktadır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi, akışkan yataklı buhar kazanlarının akış alanlarının, gaz-katı hidrodinamiğinin, ısı transferlerinin vb. bölgesel sorunların da modellenmesinde kullanılan bir yaklaşımdır. Literatürde deneysel, pilot ölçekli akışkan yatak hidrodinamiği ile ilgili çalışmalar ve ölçeklendirme çalışmaları bulunsa da endüstriyel ölçekli bir buhar kazanının HAD yöntemi ile incelenmesinde maliyeti azaltmak için farklı yaklaşımlar da kullanılması gerekmektedir. Ayrıca her bir akışkan yataklı buhar

kazanı, tasarım ve yakıt farklılıkları sebebiyle birbirinden farklı sorunlarla karşılaşabilmektedir. Bu yüzden her bir modelleme çalışması, literatürde bazı yaklaşımlar ve korelasyonların sağlanması için ortak paydada buluşsa da modellemesi yapılan kazana özgü durumlar ve sonuçlar içermektedir.

HAD yöntemi ile çözümler için birçok paket program bulunmaktadır. Bu paket programların FLUENT, FloEFD gibi genel amaçlı olanları var olmakla birlikte MFiX, Barracuda VR gibi özel amaçlı olanları da bulunmaktadır. Paket programların bazıları ticari amaçlı üretilmişken bazıları da açık kaynak kodlu ve ücretsiz olarak kullanıma/geliştirmeye hazır haldedir. Ayrıca farklı paket programların, HAD yönteminin katı-gaz modellemesi için kullanılan alt modellerinden olan TFM, DEM, PIC, CG-DEM, DDPM vb. modeller çalışmanın yapısına bağlı olarak kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada, biyokütle yakıtlı dolaşımlı akışkan yataklı (DAY) bir buhar kazanının ısıl tasarımı ve HAD yöntemi ile sayısal analizi yapılarak yatak hidrodinamiği incelenmiştir. Endüstriyel boyutta bir akışkan yatağın çözümünün oldukça maliyetli olması sebebiyle sayısal modellemede; literatürde psüdo-yanma olarak adlandırılan sınır şartları modeli kullanılmıştır. Ayrıca katı fazı modellemesi için DEM'e kıyasla büyük sistemlerde maliyeti daha düşük PIC modeli tercih edilmiştir. İncelenen DAY buhar kazanının mevcut ve öngörülen sorunları incelenerek tasarım önerileri yapılmış ve bu önerilen sonuçları kıyaslanmıştır.

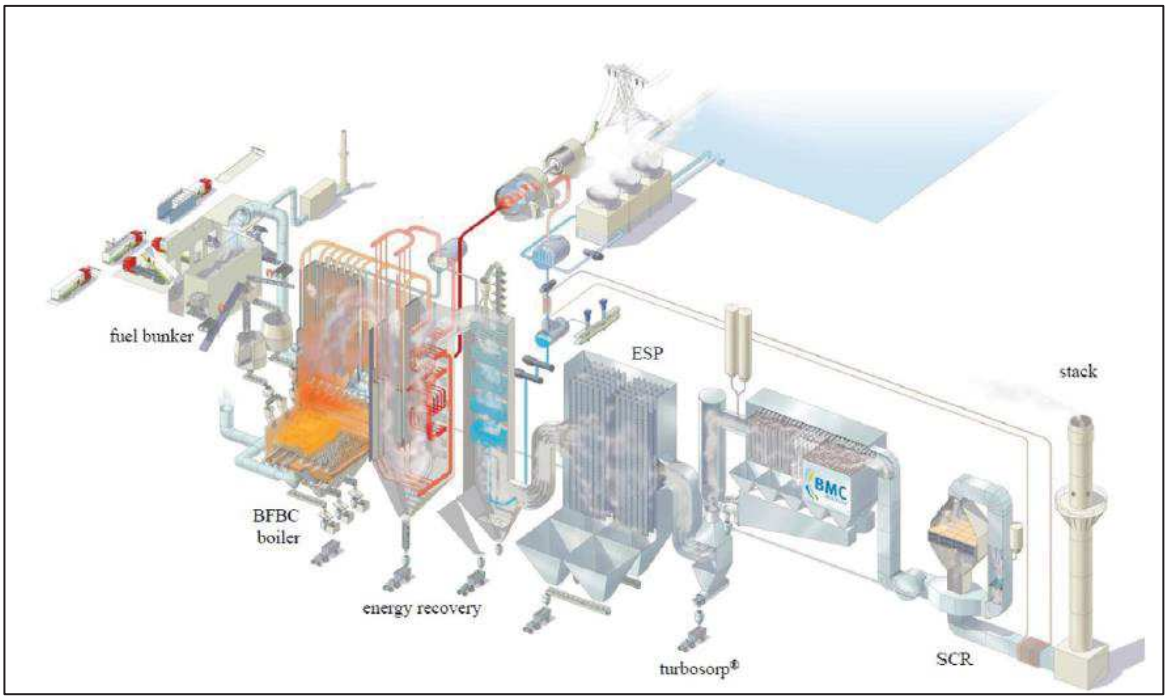
Yakıt olarak orman atıklarından üretilmiş odun cipsi kullanılan kazanın ikincil hava beslemesinin gaz ve hidrodinamik yapıya olan etkilerinin incelendiği çalışmada ayrıca HAD sayısal modelleme çalışması ile ilgili teorik bilgiler ile birlikte nümerik şemaların çözüme/çözüm süresine etkisi incelenmiştir.

Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanları; yakıt içindeki uçucuları yüksek verimle yakabilmesi ve yakıt esnekliğine uyum sağlayabilmesi sebebi ile dünyada, özellikle biyokütle yakıtları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan tez çalışmasının literatüre ve araştırmacılara katkı sunması, endüstriyel ölçekli çalışmalar için sanayi kuruluşlarına katkı sunarak, özellikle biyokütle yakılması durumunda DAY tipi buhar kazanlarında yaşanan dolaşım sorunları ve sinter oluşumu gibi sorunların çözümünde örnek teşkil etmesi amaçlanmıştır.

# 2. LİTERATÜR

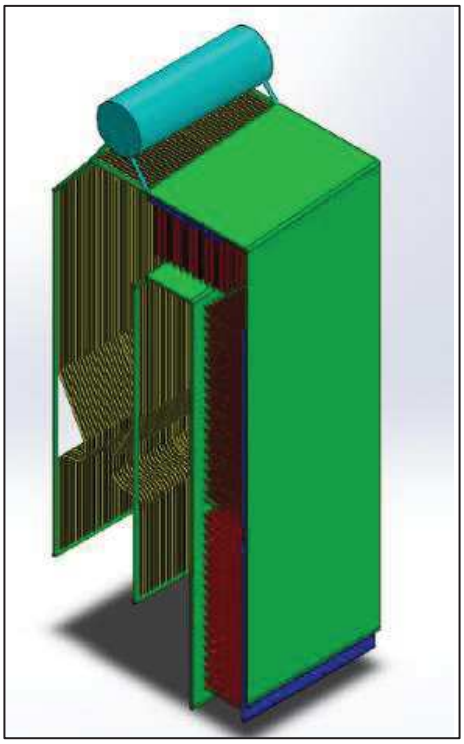
Biyokütlelerin akışkan yataklı kazanlarda yanmasının anlaşılması ve geliştirilmesi için, çok-fazlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile literatürde yapılmış çokça çalışma bulunmaktadır. Bilgisayar ve işlemci teknolojileri geliştikçe, çalışmaların kapsamı da değişkenlik göstermiştir. Literatürdeki çalışmalar genel olarak çalışmanın amacına ve maliyetine bağlı olarak iki/üç boyut, soğuk/sıcak model olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümde, biyokütle yakıtlı ve akışkan yataklı buhar kazanı tasarımları ile birlikte iki veya üç boyutlu, İAM (TFM), AEM (DEM), HPM (PIC) vb. metotlar kullanılarak, farklı kazan ve yakıt tipleri için yapılmış sayısal çalışmalar sunulmuştur.

Billen vd., yakıt olarak 6-8 MJ/kg ısıl değere sahip, görece kuru tavuk çiftliği altlığı kullanan kabarcıklı akışkan yataklı bir elektrik santralini çevresel etkileri yönünden incelemişlerdir. Şekil 2.1'de incelemesini yaptıkları enerji santralinin genel şeması verilmiştir. Çalışmada biyokütlenin, kömür ile yer değiştirmesi ve direkt toprağa atılmasının akışkan yatakta yakılması prosesi ile çevresel etki yönünden kıyaslamasını yapmışlardır. Tavuk gübresinin elektrik üretiminde geleneksel fosil yakıtlarla yer değiştirmesinin olumlu çevresel etkilerinin olduğunu rapor etmişlerdir. Ancak biyokütle yanmasının aglomerasyon, çökelme gibi sonuçlarının tasarımda dikkate alınması gereken sorunlar olduğuna dikkat çekmişlerdir. Ayrıca büyük oranda Azot (N) içerdiğinden nitrifikasyon-denitrifikasyon olayları sonucu toprağa karışmasının, yakılmasından daha fazla $NH_3$, $N_2O$ ve $NO_x$ emisyonuna sebep olacağını belirtmişlerdir [1].



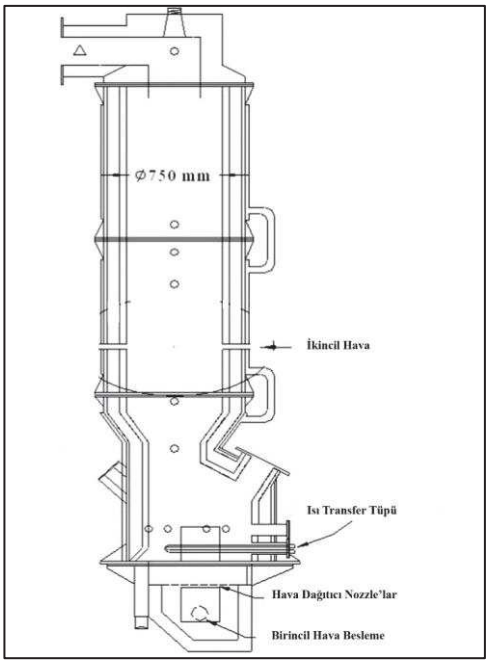

Şekil 2.1. Tavuk çiftliği altlığı yakıtlı kabarcıklı akışkan yataklı buhar kazanına sahip bir elektrik santralinin genel şeması[1]

Topal, N-pentan ile çalışan, 2 MWe kapasiteli organik rankine çevrimi için buhar üreten, ATY (RDF) yakıtlı bir dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanının termal tasarımını yapmıştır. Şekil 2.2'de ısıl tasarımını yapmış olduğu akışkan yataklı buhar kazanının katı model görünümü verilmiştir. Çalışmada tasarımı yapılan buhar kazanının 110 bar, 550 °C kızgın buhar ürettiğini belirtmiştir. Sistemdeki su debisi 24 ton/s, pentan debisi 20 ton/s olarak verilmiştir. Tasarım için kazanın su tarafında gerekli noktaların basınç ve sıcaklık değerlerini belirledikten sonra her bir ısı transfer yüzeyi için gerekli ısı ihtiyacını belirlemiştir. Buhar kazanı tasarımı için termodinamik denge yaklaşımı kullanarak yakıtın özelliklerine bağlı olarak kazan geometrisini, belirlemiş olduğu miktardaki yakıt debisi için gerekli yakma havası ve yanma gazı debisini analitik olarak hesaplayarak rapor etmiştir. Hesaplamış olduğu yakma havası konsantrasyonu ve sıcaklığına bağlı olarak ısı transfer katsayılarını belirleyerek, gereken ısı transferi yüzey alanlarını (buharlaştırıcı, kızdırıcı, ekonomizer, hava ön ısıtıcı) hesaplamıştır. Ayrıca maliyet hesaplarını da çalışmasına ekleyen Topal, buhar kazanı maliyet hesabı için direkt maliyete etki eden ısı transfer yüzeylerini ve maliyeti dolaylı etkileyen inşaat, koruma ekipmanları, yardımcı ekipmanlar vb. değerleri de dahil etmiştir [2].



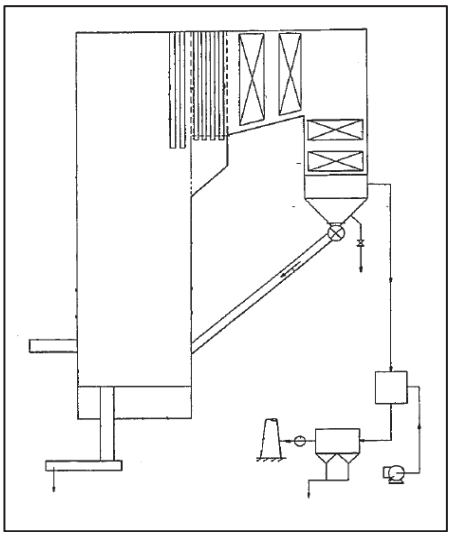
Şekil 2.2. ATY (RDF) yakıtlı buhar kazanının katı modeli [2]

Duan vd., ATY (RDF) ve odun talaşının vorteksli akışkan yataklı yakıcıda yanma davranışlarını ve kirletici emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, yatak sıcaklığı, hava fazlalığı ve yatak içi stokiyometrik oksijen oranı parametrelerinin yanmaya etkisini dikkate almışlardır. Şekil 2.3'te çalışmada kullandıkları vorteksli akışkan yataklı yakıcı gösterilmiştir. Çalışmalarında kullanmış oldukları akışkan yatağın 4500 mm, çapı ise 750 mm olarak verilmiştir. İnert yatak malzemesi olarak 2600 kg/m$^3$ yoğunluğa sahip, ortalama 0,587 mm çaplı silika kum kullandıklarını belirtmişlerdir. [3].



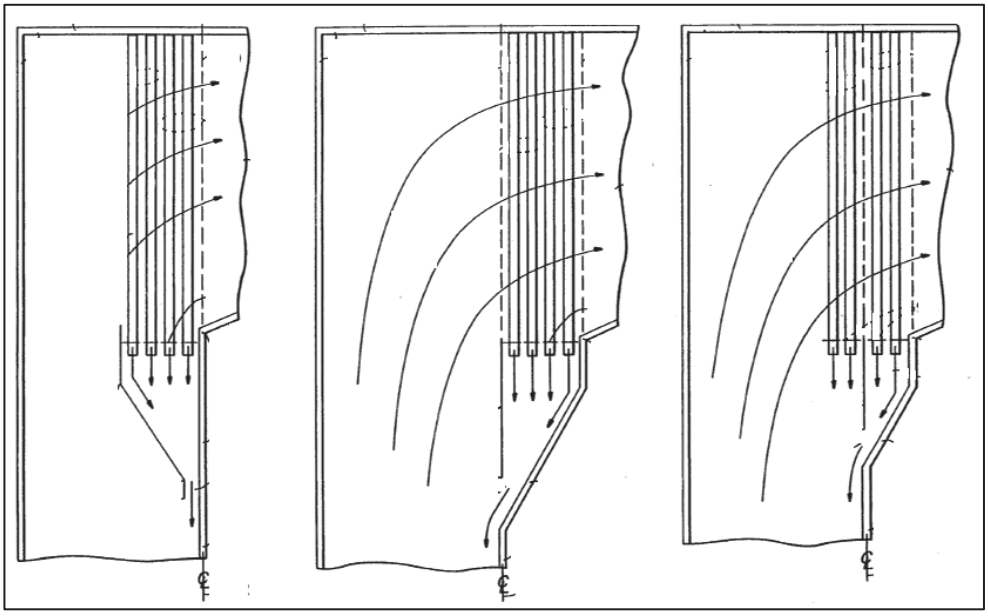

Şekil 2.3. Vorteksli akışkan yataklı yakıcı [3]

Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanlarında katı partikül dolaşımının sağlanması ve baca gazından ayırarak yatağa tekrar döndürülmesinin sağlanması büyük önem teşkil etmektedir. Alexander vd., bulmuş oldukları patentte dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanının partikül dolaşımının iç separatörlerle sağlanması için çalışmışlardır [4]. Partiküllerin çarparak yatağa düştüğü U-kirişler ile iç dolaşımın sağlandığı bir dolaşımlı akışkan yatağın şemasını Şekil 2.4'teki gibi vermişlerdir.



Şekil 2.4. İç dolaşımlı akışkan yataklı bir buhar kazanının şeması [4]

Yaptıkları patent çalışmasında partikül dolaşımını sağlarken gaz akışının da kararlı olarak sürdürülebilmesi için partikül dönüş bölgesine farklı tasarım önerileri sunmuşlardır. Alexander vd., ilgili patent çalışmasında dolaşım için tasarım önerileri olarak harici siklon ve u-kiriş ve harici siklonun birlikte kullanılması ile ilgili tasarımlar bulmuşlardır. Ayrıca harici siklon olmadan u-kirişlerin kullanıldığı dönüş bölgesi yapıları için, gaz akışı ve katı dolaşımını etkileyecek birçok tasarım sunmuşlardır. Şekil 2.5'te ilgili patentte sunulmuş olan, u-kiriş yerleşimleri için tasarımlar verilmiştir. Dönüş bölgesini ana yataktan ayıran ayırıcı duvarın şekli ve u-kirişlere göre konumu partikül hareketlerini de etkileyeceği için farklı tasarımlar sunmuşlardır.



Şekil 2.5. Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanının dönüş bölgesi için tasarımlar [4]

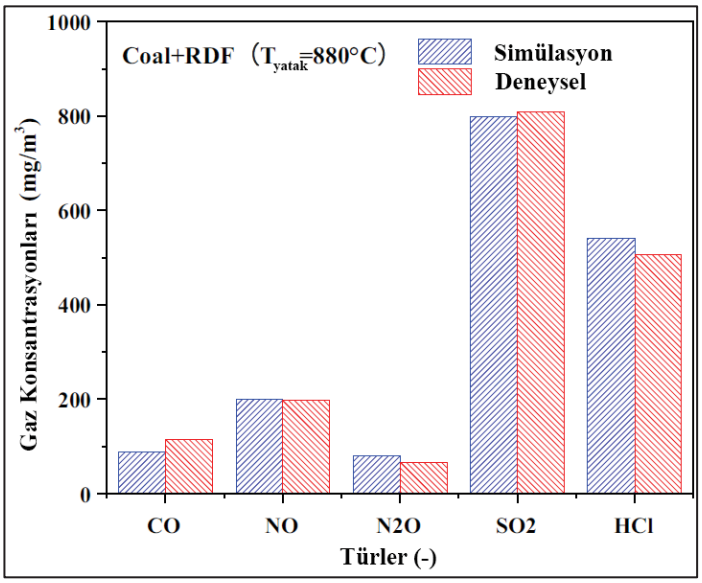
Patentte bulunan diğer tasarımları u-kirişlerin yarısının ayırıcı duvarın önünde, yarısının ise ayırıcı duvarın arkasında olacak şekilde konumlandığı seçenekler olarak sunmuşlardır. Patentteki diğer tasarımlar u-kirişlere çarparak düşen partiküllerin, iç dolaşımın harici siklon olmadan yapılması ile ilgili buluşlarının yer ve inşaat maliyetinden, operasyon maliyetinden tasarruf ettirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca önerilen yöntemle birlikte kazanda istenilen gaz/katı karışımının sağlandığını; bu sayede ısı transferinin, karbon dönüşüm veriminin ve sorbent kullanılabilirliğinin istenilen seviyede olduğunu rapor etmişlerdir [4].

Gomez vd. biyokütle peleti yakıtlı, 27 kW sabit yataklı bir buhar kazanının yanma prosesini HAD yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmada ticari bir HAD yazılımı olan ANSYS Fluent kullanarak; gaz fazını Euler yaklaşımı ile hesaplamışlardır. Katı partikül

davranışının takibi için Fluent'in sahip olduğu ayrık parçacık yöntemi (DPM) kullanılarak sayısal çözümler yapmışlardır. HAD yöntemini doğrulama deneyleri için 0,04m x 0,2m x 0,55m boyutlarında bir kazan kullanmışlardır. Dört farklı deney yapmışlar; hava fazlalığı büyüklüğünü (1,6 ve 1,9) ve besleme tipini (vidalı ve kayışlı besleme) değiştirmişlerdir. Çözüm için oluşturulan alt modellerden biyokütlenin termal dönüşümü, ısı ve kütle transferi, katı-gaz etkileşimleri gibi modelleri, deneysel verilerle doğrulamışlardır. Kullanılan HAD programının temelde gaz fazı kimyasal tepkimeleri çözmek üzerine geliştirilmesinden ötürü, katı fazı için kuruma, uçucu salınımı, yanma vd. kinetikleri ve bunlarla ilişkili tanımlamaları literatürden faydalanarak yapmışlardır. Partikül özkütlesini belirlerken nem, kuru odun ve char özkütlelerini ayrı ayrı tanımlamışlar ve toplamışlardır. Türbülans çözümünü k-ε metodu ile, tüm denklemlerin çözümü için boyutsal ayrıklaştırmayı PRESTO ile yapmışlardır. Hücre boyutlarını yatak bölgesinde 3 mm, geri kalan bölgelerde 5 mm olarak belirlemişlerdir. Çalışmadaki hücre büyüklüklerinin, partikül çapından büyük olmadığı için (8.8 mm) önemli hesaplama hatalarının oluşmadığını rapor etmişlerdir. Ayrıca sıcaklık ve $CO_2$ değerlerinin deneysel verilerden daha düşük tahmin edildiğini rapor etmişlerdir. Bunun sebebinin de ölçüm noktalarının tepkimelerin gerçekleştiği bölgeden uzaklığı olabileceğini varsaymışlardır. Besleme mekanizmasının CO derişimine etkisini inceleyen bu çalışmada; katı fazın Lagrange yaklaşımıyla incelenmesinin, partikül davranışını anlamada önemli olduğunu göstermişlerdir [5].

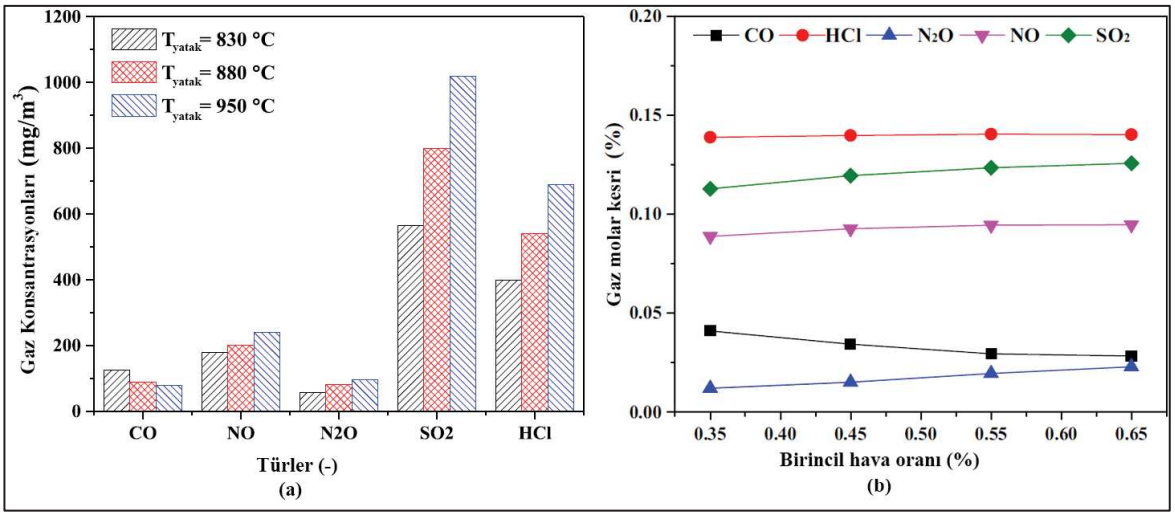
Kong vd., pilot ölçekte sirkülasyonlu akışkan yataklı bir buhar kazanındaki kömür ve RDF birlikte yanmasını PIC metodu ile sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, gaz-katı sürükleme modeli için Gidaspow'un Wen-Yu/Ergun modellerinin kombine edilmiş halini kullanmışlardır. Bu modelin büyük ölçekli iki fazlı akış çalışmalarında, seyrek ve yoğun bölgeleri daha başarılı tahmin edebildiğini ifade etmişlerdir. RDF ve kömür içeriğine bağlı olarak (ayrıca kükürt yakalama için yatağa beslenen kireçtaşı için) kimyasal tepkimeleri doğru tahmin edecek denklemler ve kinetiklerini tanımlamışlardır. Çalışmada kullandıkları kazanın 0,5 MW kapasiteli, yoğun bölgede 220 mm, seyrek bölgede 330 mm çapta ve toplam 11,2m yüksekliğinde olduğunu belirtmişlerdir. Su duvarının seyrek bölgenin başlangıcından kazan çıkışına kadar yükseldiğini ve başlangıçta 340 °C kabul ettiklerini belirtmişlerdir. Katı partikül modeli için literatürde PIC metodunda bolca kullanılan ortalama çap kabulü yerine, çalışmada kullanılan ticari Barracuda VR paket programının sunduğu partikül boyut dağılımı kullanılarak gerçeğe daha yakın bir yatak malzemesi dağılımı oluşturmuşlardır. Oluşturulan HAD modelini doğrulamak için öncelikle hücre

sayısından ve parsel sayısından bağımsızlık çalışmaları yapmışlardır. Daha sonra sayısal model sonuçlarının, sıcaklık, gaz dağılımı gibi deneysel sonuçlarla uyum sağladığını rapor etmişlerdir. Deneysel sonuçlarla doğrulanan modeldeki sıcaklık, basınç ve gaz konsantrasyonlarını bölgesel olarak raporlamışlar ve çalışma parametrelerinin kirletici gaz emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Siklon çıkışındaki gaz konsantrasyonları dikkate alınarak simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırmasını Şekil 2.6'daki gibi sunmuşlardır.



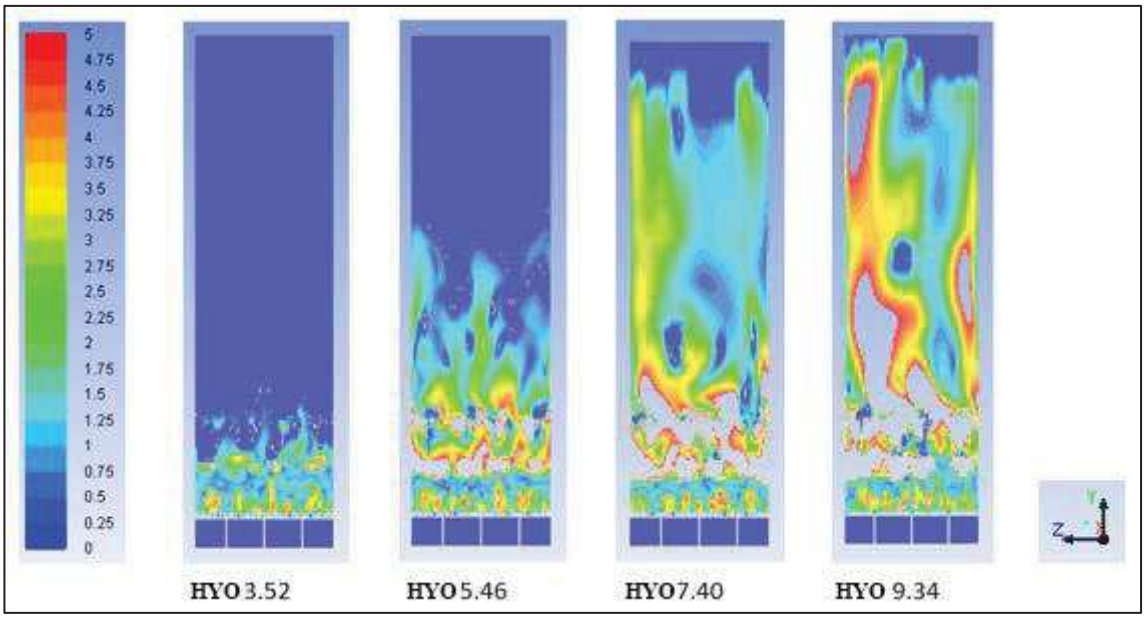

Şekil 2.6. Simülasyon ve deneysel sonuçların siklon çıkışında baca gazları cinsinden karşılaştırması [6]

Yatak sıcaklığı arttıkça NO, $N_2O$, $SO_2$ ve HCl miktarının artarken CO miktarının azaldığını; birincil hava oranının arttıkça NO, $N_2O$, $SO_2$ miktarı artarken CO miktarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Baca gazının yatak sıcaklığına ve birincil hava oranına bağlı değişiminin Şekil 2.7'de verilen grafiklerdeki gibi olduğunu rapor etmişlerdir. Gaz konsantrasyonlarını gözlemlemenin yanı sıra, PIC metodunun kimyasal tepkimeler gerçekleşen bir kazanda kullanılabileceğinin doğrulandığını da rapor etmişlerdir [6].




Şekil 2.7. Baca gazının yatak çalışma parametrelerine göre değişimi; a) yatak sıcaklığına bağlı değişimi b) birincil hava oranına bağlı değişimi[6]

Tarmizi vd. 22,5 MW kapasiteli sirkülasyonlu akışkan yataklı bir buhar kazanının yanma boyunca ikincil hava debisinin yatak karakteristiğine etkisini HAD yöntemi ile araştırmışlardır. 9,33m x 11,656m x 31,775m ölçülerindeki kazan geometrisini 2273622 adet kafes hücresine ayırmışlardır. Birincil hava debisini 11,46 kg/s, kömür besleme debisini 4,94 kg/s değerinde sabit tutmuşlar ve ikincil hava debisini 4,34 kg/s (HYO = 3,52), 13,92 kg/s (HYO = 5,46), 23,55 kg/s (HYO = 7,40), 33,15 kg/s (HYO = 9,34) değerlerinde kullanarak hesaplamalarını yapmışlardır. Boş kolon gaz hızını incelediklerinde HYO = 3,52 olması durumunda akışkanlaşmanın gerçekleşmediğini, HYO = 9,34 olması durumunda ise boş kolon gazı hızının 6,7 m/s'yi geçmesinden dolayı yatak malzemesinin yatak üstüne taşındığını gözlemlemişlerdir. Basınç dağılımını incelediklerinde ise HYO = 5,46 için basınç miktarının yoğun yatak bölgesinde +6642,3 Pa, orta bölgede ise -868,6 Pa olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada ikincil hava miktarının yatak hidrodinamiğine, sabit, kabarcıklı, sirkülasyonlu ve hızlı akışkan yatak tipi değişimlerine etki ettiğini rapor etmişlerdir. Şekil 2.8'de ikincil hava hızındaki değişimin yataktaki kum hızına etkisini göstermişlerdir [7].

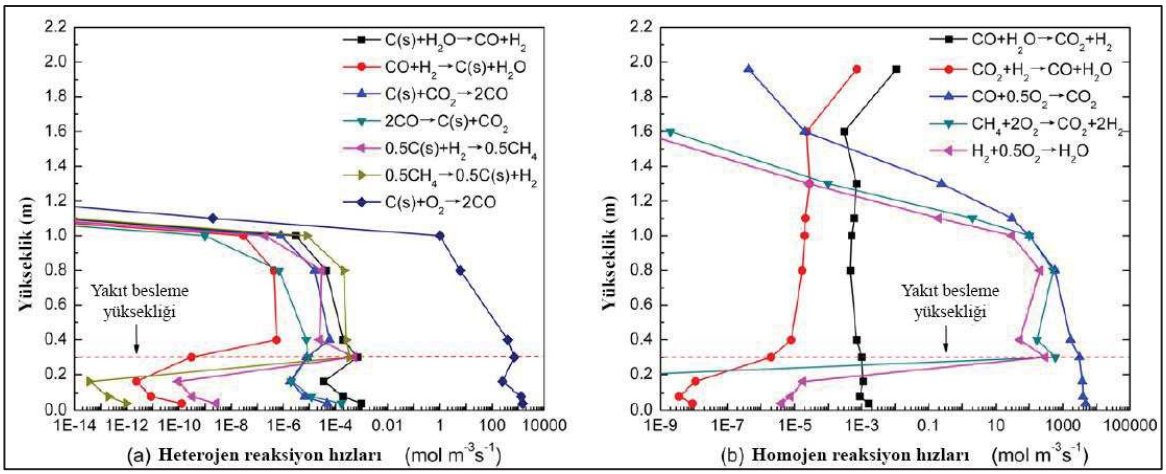



Şekil 2.8. İkincil hava hızının değişimiyle, hava yakıt oranındaki (HYO) değişimin yataktaki katı hızlarına etkisini gösteren katı hız konturları [7]

Debnath vd. ANSYS Fluent paket programı ile 0,1mm çapında, 0,62mm yüksekliğinde bir akışkan yatağın iki boyutlu, Euler-Euler yaklaşımı ile sayısal modellemesini yapmışlardır. Çalışmada deney düzeneğine farklı seferlerde 0,05 m/s, 0,10 m/s, 0,15 m/s, 0,19 m/s ve 0,55 m/s hızlarında hava beslemişlerdir. Akışkan yatakta 0,3mm çapında 1242 kg/m$^3$ özkütleye sahip biyokütleyi, yatak malzemesi olarak kullanmışlardır. Sayısal modelde katı-gaz sürükleme modeli olarak Syamlal ve O'Brien'in sürükleme modelini[8] kullanmışlardır. Minimum akışkanlaşma hızını ve hidrodinamik yapıyı deneysel ve sayısal olarak gözlemledikleri çalışmalarında, sonuçların uyumlu olduğunu ve ölçek büyütme çalışmalarında kullanılabilecek bir model olduğunu raporlamışlardır [9].

Xie vd. HPM (PIC) metodu ile akışkan yataklı bir kömür gazlaştırıcısının üç boyutlu Euler-Lagrange yaklaşımı ile sayısal modellemesini yapmışlardır. Çalışmada kullanılan reaktörün çapının 0,22m, yüksekliğinin 2m olduğunu belirtmişlerdir. Türbülans çözümü için büyük girdap simülasyonu (LES) metodunu, katı partikül dağılımı için ise partikül dağılım fonksiyonunu (PDF) kullanmışlardır. Sayısal çözüm için gaz basıncı ve sürekliliğini kontrol etmek için SIMPLE ayrıklaştırma şemasının kullanıldığını belirtmişlerdir. Sayısal çalışmada kullanılan reaktörün 0,62mm ortalama çaplı kuvars partikül ile 1m yüksekliğe kadar, 0,5 sıkı istif kütle kesri ile doldurulduğu belirtilmiştir. Ayrıca başlangıç şartı olarak reaktör ortamını $N_2$ ile doldurmuşlardır. Partikül momentum tutulma katsayısı olarak normal-duvar için 0,2, tanjant-duvar için ise 0,99 kullanmışlardır.

Zaman adımı olarak ise 1,8 x $10^{-4}$ kullanmışlardır. Deneysel verilerle karşılaştırdıklarında $N_2$ için %5'ten az, CO ve $H_2$ için yaklaşık %10, $CH_4$ için ise %20'den fazla fark olduğunu rapor etmişlerdir. CH4 için hata seviyesinin yüksek olmasının sebebi olarak molar kesrinin %1 olmasını göstermişlerdir. Değerin küçük olmasından ötürü tahmin edilebilirliğin zorlaşabileceğini savunmuşlardır. Simülasyondaki $CO_2$ değerinin gerçekten daha düşük tahmin edilmesinin sebebini ise çalışmada kireçtaşının ve gerçekleştireceği tepkimelerin ihmal edilmesinden dolayı olduğunu savunmuşlardır. Çalışmada, gaz ve katı partiküllerin dağılımlarını ve homojen, heterojen kimyasal tepkimelerin reaksiyon hızlarını yatak bölgelerine göre karşılaştırarak incelemişlerdir ve Şekil 2.9'daki gibi rapor etmişlerdir [10].




Şekil 2.9. t=30 s anında yatak yüksekliğine bağlı heterojen ve homojen reaksiyonların hızları[10]

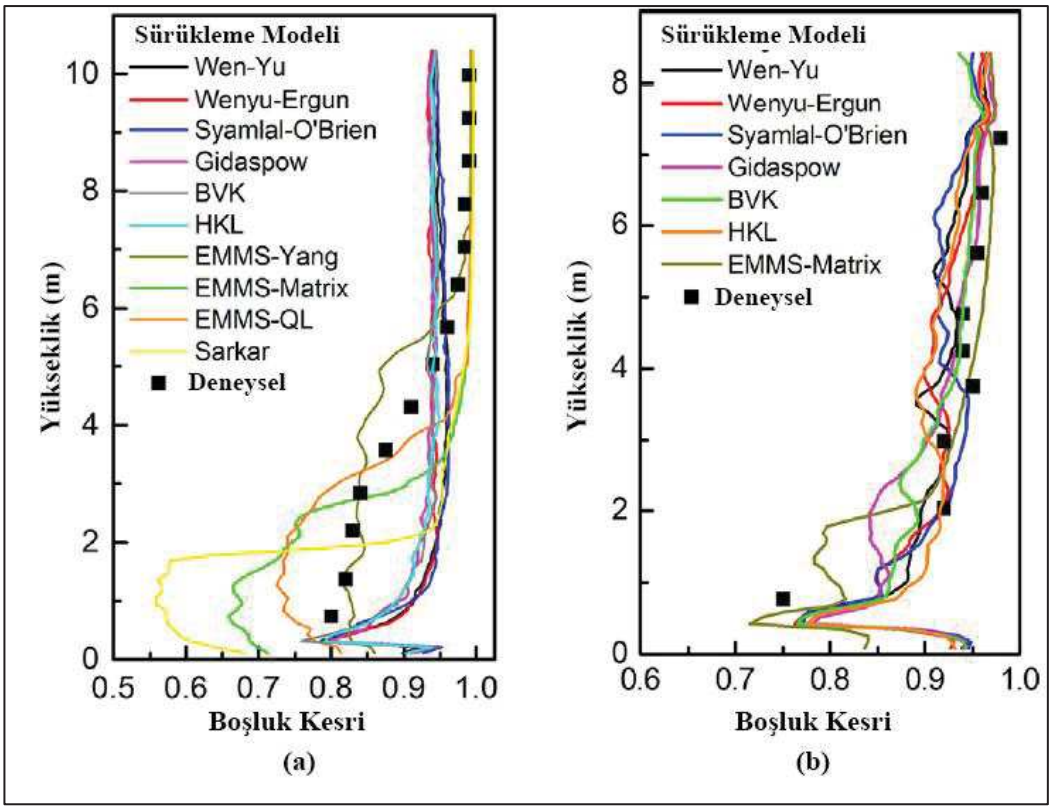
Wang vd. biyokütle yakıtlı, kabarcıklı akışkan yataklı bir gazlaştırıcı reaktörün, yatak bölgesinin iki boyutlu hidrodinamik ve kimyasal modelini 2 boyutlu AEM(DEM) metodu ile sayısal olarak çalışmışlardır. Song ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışmanın gazlaştırıcı yatak bölgesinden elde ettikleri sonuçları [11], oluşturdukları sayısal modeli doğrulamak için kullanmışlardır. Açık kaynak kodlu MFiX paket programı kullanılarak yaptıkları çalışmada, partiküller arası etkileşim için lineer-olmayan Hertzian temas modelini ve lineer LSD (lineer spring-dashpot) modelini karşılaştırmışlardır. Ayrıca gaz-katı etkileşimi için kullanılan gaz sürükleme modeli olarak dört farklı model (Gidaspow, Syamlal-O'Brien, Koch-Hill, BVK) kullanmışlardır. Yataktaki inert kum partiküllerin ve biyokütlenin çapını 1,5 mm olarak belirlemişlerdir. Ayrıca hücre boyu/partikül çapı oranını ise 3,33 – 6,67 aralığında belirleyerek bir kafes hücre yapısı oluşturmuşlardır. Çözüm için kullanılan zaman adımını ise 1 x $10^{-6}$ olarak belirlemişlerdir. Hertzian modelinin, LSD

modeline göre 6,8 kat fazla hesaplama süresi gerektirdiğini rapor etmişlerdir. Gaz-katı sürükleme modellerinin ise katı hidrodinamiğine etkisinin önemli ölçüde olduğunu belirtirlerken, yatak çıkışı gaz konsantrasyonuna büyük bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Literatürdeki birçok çalışmadan farklı olarak tüm denklemler için tek bir ayrıklaştırma şeması kullanmak yerine farklı ayrıklaştırma şemalarını bir arada kullanmışlardır. Yüksek mertebeli ayrıklaştırma şemalarının, düşük mertebelilere göre daha geç yakınsamasına rağmen bazı durumlarda Van Leer şemasının Superbee şemasına göre daha hızlı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bunun sonucunda geçici ayrıklaştırma için Implicit Euler kullanmışlardır. Gaz basıncı, U-momentum, V-momentum ve kütle kesri için Van Leer şeması; hacim kesri, W-momentum, enerji, granüler enerji ve k-ε için ise Superbee şemasını kullanmışlardır. Kimyasal tepkime modellerinin çözümü sonucunda oluşturdukları modelin CO ve $CO_2$ gazlarını gerçek değerlerinin üstünde tahmin ederken, $H_2$ ve $CH_4$ gazlarının ise gerçek değerden düşük tahmin ettiğini rapor etmişlerdir. Gerçek değerlerden uzaklaşılmasının sebeplerinden bazılarını, geometri ve kimyasal reaksiyonların basitleştirilmesi olarak sunmuşlardır. Wang ve arkadaşlarının vardığı sonuca göre 3 boyutun, 2 boyuta basitleştirilmesi duvar efektlerinin yok sayılmasına sebep olduğundan gerçek değerlerden uzaklaşmaya da sebep olmaktadır [12].

Li vd. piroliz fırınında, düşük kaliteli pulverize kömür için HPM (PIC) metodu ile HAD çalışması yapmışlardır. Reaksiyonlar için dağıtılmış aktivasyon enerjisi modeli (DAEM) kullanılan çalışmada, 1,2 m x 2,7 m boyutunda, 10,05 m yüksekliğinde bir piroliz fırını kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan kafes hücre sayısının 21x184x49 olduğunu, zaman adımının ise 5 $x10^{-4}$ olduğunu belirtmişlerdir. Partikül momentum tutulma katsayısı olarak normal-duvar için 0,90 ve tanjant-duvar için ise 0,30 kullandıklarını belirtmişlerdir. Kömür debisi olarak 1,2 t/h ile endüstriyel ölçekli gerçek verileri doğruladıktan sonra 1,5 t/h, 2.0 t/h, 2,5 t/h ve 3,0 t/h kömür besleme debileri ile parametrik çalışmalar yapmışlardır. Çok yüksek kömür kapasitesinin, fırın sıcaklığının düşmesine sebep olacağını bu yüzden de piroliz veriminin düşeceği sonucuna varmışlardır. Üzerinde çalışılan piroliz fırını için 2,5 t/h kömür debisinin altında gaz ayırma debisinin %85'e ulaşabileceğini rapor etmişlerdir [13].

Xie vd. gaz-katı hidrodinamiğini belirleyen en önemli modellerden biri olan sürükleme modellerini incelemek için Geldart A (54 μm) ve Geldart B (300 μm) partiküllerinden oluşan iki farklı CFB yatak için PIC metodu ile HAD çalışması yürütmüşlerdir. Yaptıkları

çalışmada altı adet homojen (Wen-Yu, Wen-Yu/Ergun, Syamlal-O'Brien, Gidaspow, HKL ve BVK), dört adet heterojen (Sarkar, EMMS-Yang, EMMS-Matrix, EMMS-QL) sürükleme modelini karşılaştırmışlardır. Partikül momentum tutulma katsayısı için normal-duvar 0,3 ve tanjant-duvar 0,99 olarak kullanmışlardır. Ayrıca PIC metodunda çözüme etki eden diğer parametrelerden olan hücre sayısı, partikül/parsel oranı ve zaman adımı için farklı değerler ile çözümler yapmışlardır. Çalışmadaki en uygun hücre sayısı/partikül çapı oranının Geldart A partikülleri için $90d_p$ x $90d_p$ x $640d_p$, Geldart B partikülleri için ise $65d_p$ x $65d_p$ x $120d_p$ olduğuna karar vermişlerdir. Zaman adımı olarak 5 x $10^{-4}$ s kullanmışlardır. Partikül/parsel oranının ($n_p$) eksenel boşluk kesrine önemli bir etkisinin olmadığını, ancak $n_p$ azaldıkça katı akısının arttığını raporlamışlardır. Zaman adımının ise boşluk kesri ve katı akısı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Şekil 2.10'da rapor ettikleri üzere, iki farklı yatakta farklı sürükleme modelleri ile yaptıkları sayısal çalışmanın yükseklik-boşluk kesri sonuçları gösterilmiştir. Geldart A partikülleri için heterojen sürükleme denklemlerinin daha doğru sonuçlar verdiği, Geldart B partiküller için ise Wen-Yu/Ergun modelinin diğerlerinden daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [14].




Şekil 2.10. Geldart A ve Geldart B partikülleri ile doldurulmuş iki farklı dolaşımlı akışkan yatağın farklı sürükleme modelleri ile yüksekliğe bağlı boşluk kesri karşılaştırması. a) Geldart A partikülü kullanılan yatak b) Geldart B partikülü kullanılan yatak [14]

Gu vd. akışkan yatakta basınçlı oksi-kömür yanmasını incelemek için sayısal bir model oluşturmuşlardır. PIC metodunu kullandıkları çalışmada heterojen ve homojen kimyasal reaksiyonları da dikkate almışlardır. 15 $kW_{th}$ kapasiteye sahip yakıcıda oksijen atmosferinde 0,1, 0,5, 1, 1,5 ve 2 MPa basınçlarda çalışmayı yürütmüşlerdir. Doğrulama yapılan deney düzeneğindeki şartlara bağlı olarak sayısal çalışmaları, BFB yatağında doğrulamışlardır. Çalışmada kum özkütlesini 2600 $kg/m^3$, giriş hava sıcaklığını 473K, $O_2$ fazlalık katsayısını 1,25, birincil/ikincil hava oranını 0,65/0,35 olarak belirlemişlerdir. PIC parametreleri olan partikül momentum tutulma katsayısı olarak normal-duvar için 0,3, tanjant-duvar için 0,99 olarak belirlemişlerdir. Ayrıca sıkı istif hacim kesrini 0,58, maksimum çarpışma momentum yeniden yönlendirme değerini %40, $P_s$ sabitini 1 Pa, B sabitini 3, $E_{ps}$ sabitini 1 x $10^{-8}$ olarak belirlemişlerdir. Sayısal çözüm zaman adımını 1 – 10 x $10^{-4}$ aralığında ayarlamışlardır. Gaz-katı sürükleme modeli olarak Wen-Yu/Ergun, türbülans modeli olarak ise LES modelini kullanmışlardır. Başlangıç sıcaklık şartlarını 1073K olarak belirlemişlerdir. Silika kum ve kömür boyutlarını belirlemek için partikül boyut dağılımını kullanarak yatakta farklı çapta materyal olmasını sağlamışlardır. Hesaplama hataları ve hesaplama maliyetlerini kabul edilebilir oranlarda tutabilmek için kafes hücre boyutunun, partikül çapından üç kat büyük olacak şekilde hücreden bağımsızlık testlerini yapmışlar ve 9,1 mm hücre boyutunun dengeli bir değer olduğunu belirtmişlerdir. Yanma basıncı arttıkça yoğun bölgedeki $O_2$ konsantrasyonu arttığı için, yoğun bölgedeki katı faz sıcaklığının arttığını ancak üst bölgede azaldığını gözlemlemişlerdir. Yatak yüksekliğinin artmasıyla yoğun bölgede $CO_2$ konsantrasyonun arttığını, $O_2$ ile $CO_2$'nin ters orantılı değişim gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca basınç artışının CO ve $NO_x$ emisyonlarını düşürmek için kullanılabileceğini rapor etmişlerdir. Basınç artırımının kömür yanmasına etkisini değerlendirdiklerinde; enerji ve yanma verimliliği, emisyon yayılımı gibi konular dikkate alındığında 1MPa değerinin en uygun değer olacağına karar vermişlerdir [15].

Cui vd. kömür yakıtlı 10MW bir CFB kazanın PIC metodu ile 3 boyutlu HAD çalışmasını yapmışlardır. Çalışmada 3,557 x 3 $m^2$ kesit alanına ve 21,01 m yüksekliğe sahip bir yatak ve süperkritik $CO_2$'ye (S-$CO_2$) sahip duvar bulunmaktadır. Yatak malzemesi olarak kullanmış oldukları silika kumun özkütlesini 2200 $kg/m^3$, kömür çapının ise 0,099 – 0,5 mm aralığında olduğunu belirtmişlerdir. Birincil/ikincil hava oranının 0,55:0,35 olduğunu ve başlangıç şartı olarak kazan havasının $N_2$ ile dolu olduğunu rapor etmişlerdir. Deneysel verilerle doğrulama işleminde siklon çıkışındaki gaz konsantrasyonunu ölçmüşler ve

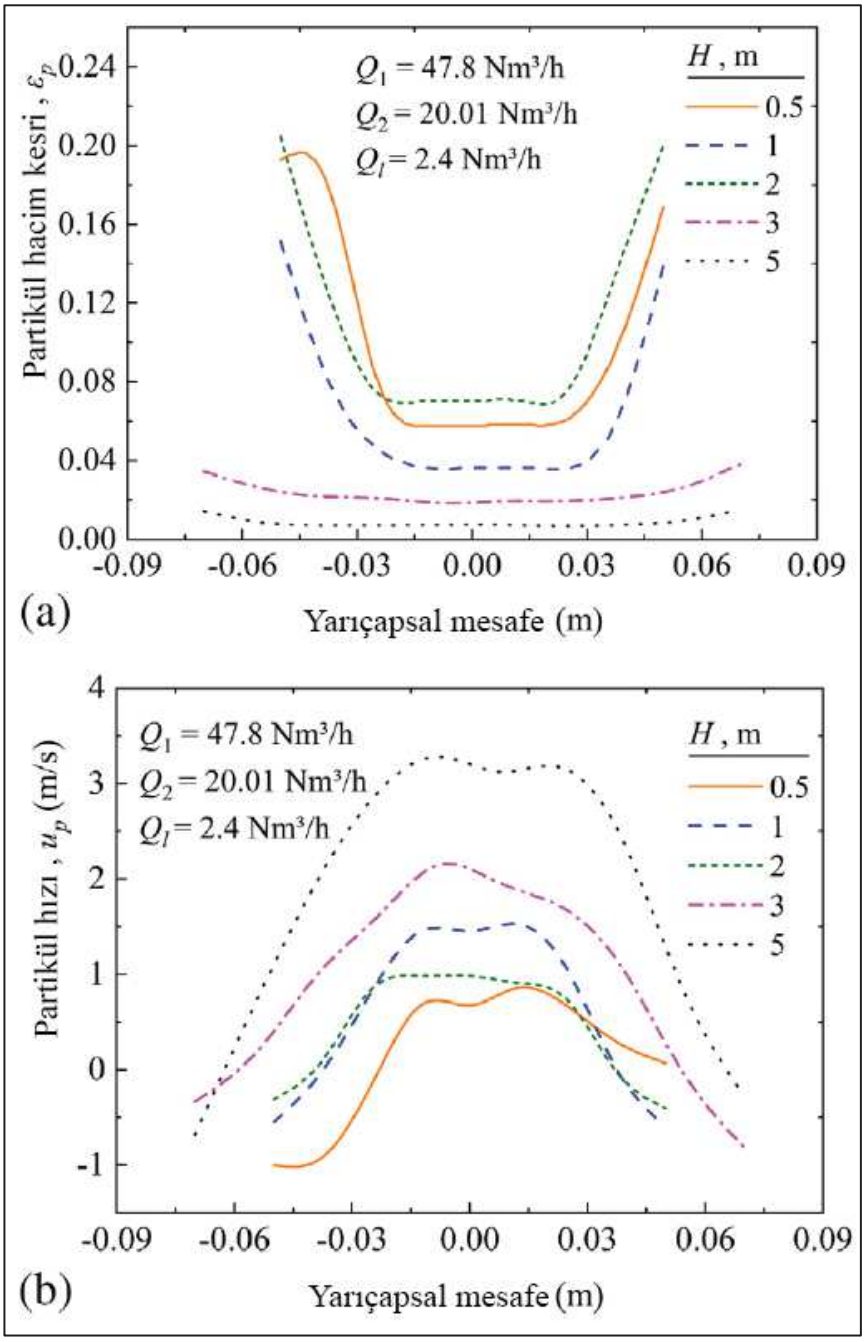
toplam ortalama bağıl hatanın %18'den az olduğunu raporlamışlardır. Farklı yüzey akıları için yaptıkları parametrik çalışmalarda yüzey akısı arttıkça yatak sıcaklığının arttığını, ancak $CO_2$ ve $SO_2$ emisyonlarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışma için ısı akısının 25 – 37 $kW/m^2$ aralığında tutularak hem malzeme masrafının yüksek olmayacağını hem de CO emisyonunun en aza indirileceğini belirtmişlerdir. Sınırların ısı akısı olarak belirlendiği durumda yatak sıcaklıklarının, sıcaklık sınır şartı olarak belirlenmesine göre daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun da $CO_2$ emisyonunun düşük olmasına sebep olduğunu savunmuşlardır. Ayrıca sabit ısı akısında, hava fazlalık miktarının değişmesinin yatak sıcaklığını soğuttuğunu rapor etmişlerdir. Yatağın soğumasının sonucu olarak da $CO_2$ ve $SO_2$ emisyonlarının arttığını, CO emisyonunun azaldığını gözlemlemişlerdir [16].

Zhou vd. 50 kW CFB kazanın ana yatak bölgesini incelemek için iki boyutlu TFM metodu ile sayısal bir model oluşturmuşlardır. Oluşturdukları model, FLUENT paket programı ile çalışan, hidrodinamik ve yanma alt modellerini içeren Euler-Granüler çok fazlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelidir. Çalışmalarında gaz-katı sürükleme modeli olarak EMMS/Matrix modelini kullanmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları yatağın 122mm ve 150mm çapta yoğun ve seyreltik bölgelerinin bulunduğunu, toplam 4200mm yüksekliğinde olduğunu belirtmişlerdir. Kömür besleme noktasının birincil hava besleme noktasında 700mm yükseklikte olduğu, ikincil hava besleme noktasının ise 900mm yükseklikte olduğunu belirtmişlerdir. Gaz katı sürükleme modeli için ise Wen-Yu ve Gidaspow modellerini karşılaştırmışlardır. Yatakta kullanılan partikül çapı 0,35mm, kül özkütlesi 2400 $kg/m^3$ ve kömür özkütlesi 1280 $kg/m^3$ olarak belirtmişlerdir. Beslenen kömür debisi 8 kg/h, birincil/ikincil hava oranı 0,7/0,3, birincil hava sıcaklığı 400K, ikincil hava sıcaklığı 298K, başlangıç yatak sıcaklık şartı ise 1123K olarak verilmiştir. Çalışmada uçucu salınımı, kuruma, çar yanması ve gazlaşma homojen ve heterojen tepkimelerini yedi farklı kimyasal tepkime olarak tanımlamışlardır. TFM hesaplamalarında kullanılan bazı değerler, başlangıç yatak katı hacim kesri 0,55, maksimum partikül istif oranı 0,63, partikül-partikül restitüsyon oranı 0,9 ve kayma-olmayan duvar şartları tanımlamışlardır. Zaman adımı olarak ise $1 \times 10^{-4}$s kullanmışlardır. Yanma prosesinin kararlı hale geldiğini görmek için çıkış bölgesindeki karışım kütle debisini ve $O_2$ konsantrasyonunu ölçmüşlerdir. Sayısal çözüm ile elde edilen hidrodinamik sonuçları doğrulamak için literatürde bulunan başka bir çalışma ile karşılaştırma yapmışlardır. Radyal olarak gaz ve katı davranışlarını kazanın farklı noktalarında düşey hızlar yönünden incelediklerinde,

yoğun bölgede türbülans kaynaklı davranışların gözlemlendiğini ancak seyrek bölgeye geçtikçe grafiğin at nalı şekline (duvarlarda yavaş, orta bölgede daha hızlı) geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca katı partiküllerin, duvar bölgesinde aşağı yönde hareket ettiklerini gözlemlemişlerdir. Yanma davranışları incelendiğinde en yüksek sıcaklık değerlerinin kömür beslemesinin yapıldığı noktanın hemen üstünde gözlemlendiği belirtilirken, ikincil soğuk havanın sıcaklığı düşürdüğü belirtilmiştir. İkincil havanın ekzotermik reaksiyonların oluşmasını sağlayacak oksijeni yatağa beslemesinin sıcaklığı yükseltebileceğini ancak sıcaklığın seyrek bölgede bulunan kazan duvarlarına aktarılması sebebiyle yatak sıcaklığının yükselmediğini gözlemlemişlerdir. Yanma sonuçlarının doğruluğunu incelemek için yatak içinde bulunan gazların çıkış bölgesindeki alan ortalamalı molar kesirlerini kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarla karşılaştırılan molar konsantrasyon hataları %15'in altında çıkmıştır. Kömür yanma reaksiyonundan ötürü yoğun bölgede en çok CO gözlemlemişlerdir. Kömür yanmasını tanımlamak için kinetik tepkime hızı ($k_6$) ve oksijen difüzyon hızı tanımladıklarını (kd), ancak kd'nin $k_6$'dan yaklaşık 10 kat büyük olduğu için yanmayı kinetik tepkime hızının kontrol ettiği sonucuna varmışlardır. Kömür gazlaşma reaksiyonunun hava ortamındaki yanma için yok sayılabilecek kadar düşük olduğunu belirtmişlerdir [17].

Gu vd. 0.1$MW_{th}$ CFB kazanda oksi-yanma prosesini incelemek için üç boyutlu PIC metodu ile sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Kazanın yatak, siklon, düşüş borusu ve döngü bölgesi dahil tüm bölgelerini sayısal çalışmaya dahil etmişlerdir. 0,14m çap ve 6m yükseklikteki yatak hızına beslenen birincil/ikincil hava oranlarını 0,7/0,3 ve sıcaklıklarını ise 473,15K olarak belirlemişlerdir. Ayrıca yataktaki kum özkütlesi 2600 kg/$m^3$, kömür özkütlesi 1300 kg/$m^3$ olarak belirtilmiştir. Kazan duvarları için 648,15K, diğer duvarlar için ise adyabatik duvar şartı tanımlamışlardır. Partikül momentum tutulma katsayısı olarak normal-duvar için 0,3, tanjant-duvar için ise 0,99 tanımlamışlardır. Sıkı istif hacim kesrini ise 0,55 olarak tanımlamışlardır. Başlangıç sınır şartı olarak gaz ve katı sıcaklıklarını 1123K, yatak atmosferini ise $CO_2$ olarak tanımlamışlardır. Türbülans çözümü için LES modeli, gaz katı sürükleme hesaplamaları için ise Gidaspow modelini kullanmışlardır. Yanma prosesinin adımlarını tanımlayan ve kömürde bulunan kükürt sebebiyle ortaya çıkan $H_2S$ ve $SO_2$'yi tanımlayacak tepkimeleri de içeren toplam 10 adet kimyasal tepkime tanımlamışlardır. Çalışmada Barracuda VR paket programını kullanmışlardır. Çözüm zaman adımı olarak CFL kontrollü olarak $5x10^{-5}$ – $2x10^{-4}$s aralığının kullanıldığını belirtmişlerdir. Sonuçları incelediklerinde partikül yoğunluğunun

yatağın duvarlarında daha yüksek olduğunu, ancak düşey yöndeki hızların bunun tam tersi yönde olduğunu Şekil 2.11'deki gibi gözlemlemişlerdir.




Şekil 2.11. Farklı yatak yüksekliklerindeki zaman-ortalamalı partikül hızları ve hacim kesirleri; a) partikül hacim kesri b) partikül hızı [18]

Yoğun bölgede $CO_2$ üretiminin yüksek olduğunu anca ikincil hava besleme hava besleme noktasına doğru düşüş gösterdiğini, ikincil hava beslemesinden itibaren tekrar artmaya başladığını rapor etmişlerdir. $O_2$ ve $CO_2$ konsantrasyonlarının birbirlerine ters orantılı olarak değiştiğini, ikincil hava beslenmesi ile uçucu miktarında önemli düşüşler olduğunu

gözlemlemişlerdir. Akışkan sıcaklığının, yatağın üst noktalarında, alt noktalara göre daha yüksek olduğunu; ikincil hava ile beslenen $O_2$'nin sıcaklığı artırdığını gözlemlemişlerdir. Beslenen $O_2$ konsantrasyonunun artmasıyla kazan sıcaklığının yükseldiği, CO emisyonlarının düştüğünü görmüşlerdir. Kömür boyutlarının düşük olmasının yanma verimini düşürdüğü ve CO emisyonunu artırdığını, boyut dağılım aralığının küçük olmasının ise yanma verimini artırdığını ve CO emisyonunu azalttığını rapor etmişlerdir [18].

Jia vd. petrol şisti fırınlama katı atığı ve mısır sapı yakıtlı bir CFB kazanın simülasyonunu CPFD (PIC) metodu ile üç boyutlu olarak yapmışlardır. Çalışılan kazanın ölçülerini 0,685m x 0,184m x 9,15m olarak belirtmişlerdir. Sürüklenme modeli olarak Wen-Yu/Ergun, türbülans çözümü için LES, sıkı istif katı hacim kesri olarak 0,595, başlangıç gaz sıcaklık şartı olarak 850°C tanımlamışlardır. Diğer sayısal çözüm için gereken parametrelerini; partikül momentum tutulma katsayısı olarak normal-duvar için 0,3, tanjant-duvar için ise 0,99, zaman adımı için ise $1x10^{-3}$ olarak belirtmişlerdir. Çalışmada 667128 adet kafes hücre kullanmışlardır. Yakıt karışımını 6:4 ve 10:0, birincil/ikincil hava oranlarını 0,8:0,2, 0,667:0,333, 0,5:0,5 değerlerinde uygulayarak altı farklı çalışma koşulu ile parametrik çalışma yapmışlardır. Birincil hava debisini 20 $m^3$/sa ve 24 $m^3$/sa, katı yakıt besleme debisini ise 10 kg/sa ve 7 kg/sa olarak belirlemişlerdir. %80 birincil hava oranı ve 6:4 karışım oranında en stabil yanma koşullarına ulaştıklarını belirtmişlerdir. Petrol şist atığının düşük ısıl değeri ve yüksek kül oranı yüzünden yanma koşullarının kazan içinde ayarlanmasının zorluğuna değinmişlerdir. Kullanılan iki yakıtın birlikte yakmasının uygulanabilir olduğu ve CPFD metodunun birincil/ikincil hava ve yakıt karıştırma oranları ayarlaması için doğru sonuçları verdiği sonucuna varmışlardır [19].

El-Sayed ve Noseir [20], El-Sayed ve Noseir'in [21] pilot ölçekte gerçekleştirdiği susam ve bakla sapı talaşı yakıtlı kabarcıklı akışkan yatak yanma deneysel çalışmasının serbest yatak bölgesini 2 boyutlu HAD yöntemi ile sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada Eulerian-Lagrangian yaklaşımını kullanarak, katı faz çözümü için ANSYS Fluent paket programının içerdiği DPM metodunu uygulamışlardır. Çalışmada 5 $kW_{th}$ kapasiteli 1000 mm yüksekliğe sahip yakıcı, 398 k/$m^3$ ve 360 kg/$m^3$ özkütleye sahip iki tip yakıt ve yatak malzemesi olarak silika kum kullanmışlardır. Serbest bölge gaz ve katı giriş şartlarını belirlemek için yakıtların elemental analizinden, tür denklemlerinden ve deneysel verilerden faydalanarak analitik işlemler yaptıklarını belirtmişlerdir. Sıcaklık, karbon

yanması ve gaz türlerini tahmin etmek için sayısal çalışmada kullanılan kimyasal tepkimeler için farklı parametreler (çalışmada kullanılan Arrhenius Yasası'nın iki parametresi olan aktivasyon enerjisini ve üstel faktörü) kullanarak, kinetik parametrelerin etkilerini gözlemlemişlerdir. Reaksiyon hızının, aktivasyon enerjisiyle ters orantılı, üstel faktörle orantılı olması sebebiyle $E_{ag}$ değerinin artmasının, gaz fazı reaksiyonlarını yavaşlattığını rapor etmişlerdir. $E_{ag}$ için 70,80, 85 ve 90kj/kmol parametrelerini kullandıkları çalışmada $E_{ag}$ = 70 kj/kmol değerinin CO'nun $CO_2$'ye dönüştüğü ekzotermik reaksiyonu hızlandırdığından yatağın en yüksek sıcaklık değerine ulaştığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, $CH_4$ dönüşümünün de diğer $E_{ag}$ değerlerine göre daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. $H_20$ ve $H_2$ derişimlerinin ise yatak yüksekliği boyunca Eag değişimine bağlı olarak neredeyse hiç değişmediğini, bunun sebebinin ise kimyasal tepkimeler içinde bu iki türün bir dengede olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca, $E_{ag}$ değerinin yükselmesi ile birlikte deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farkın azaldığını gözlemlemişlerdir. Ancak, $E_{ac}$'nin (kömür aktivasyon enerjisi) sayısal sonuçlara çok fazla etki etmediğini; bunun sebebinin ise karbon yanma hızını etkileyen ana faktörün aktivasyon enerjisi değil oksijen difüzyon hızı olduğunu belirtmişlerdir. Diğer yandan, üstel faktörü artırmanın, yapılan tüm çalışmalarda deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki sapmayı azalttığını rapor etmişlerdir. Sayısal çalışma sonuçlarını incelediklerinde çıkış gaz molar derişim hatalarının en çok %3,07, eksenel sıcaklık hatalarının ise %14,77 olduğunu ve sayısal sonuçların, deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir [20].

Solnordal vd. laboratuvar ölçekli, iç sirkülasyonlu akışkan yataklı bir buhar kazanını PIC metodu ile sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal modelin doğrulanması için kullandıkları dikdörtgen kesitli kazanı iki adet ayırıcı ile bir adet reaksiyon odası ve iki adet ısı transferi olmak üzere üç odacığa ayırmışlardır. Reaksiyon bölgesindeki tepkimelerle ısınan yatak malzemesi yataktan taştıktan sonra ısı transferi odalarındaki borular ile etkileştikten sonra alt bölgeden tekrar reaksiyon odasına dönmektedir. Cam yatak malzemesinin çapının 140 μm, özkütlesinin ise 2600 kg/$m^3$ olduğunu belirtmişlerdir. 100 °C sıcaklığa sahip 2 kg yatak malzemesi kullandıkları yatak için reaksiyon odasına 0,12 – 0,5 m/s, ısı transferi odalarına ise 0,066 – 0,08 m/s boş kolon gazı hızlarında hava beslemişlerdir. PIC için kullandıkları gerekli parametreleri, sıkı istif hacim kesri 0,6 ve zaman adımı 5 x $10^{-4}$ olarak belirtmişlerdir. Katı geri dönüş hızını nitel ve nicel olarak inceledikleri çalışmada, oluşturdukları PIC sayısal modelin Geldart B partikülleri içeren kabarcıklı akışkan yataklı sistemleri modellemek için kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [22].

# 3. AKIŞKAN YATAKLI KAZANLARDA BİYOKÜTLE YANMASI

Akışkan yataklı kazanlarda biyokütle yanması, kömür vb. fosil yakıt yanması ile benzer özellikler taşımakla birlikte, birtakım farklılıklar da içermektedir. Biyokütlelerin içeriklerinin ve aynı tür biyokütlenin bölgeden bölgeye bile değişik gösterebiliyor olması, biyokütle yanmasının anlaşılması ile ilgili çalışmaları önemli hale getirmektedir.

Bu bölümde biyokütle, akışkan yataklı kazanlar, yanma ve modelleme ile ilgili teorik bilgiler sunulmuştur.

## 3.1. Biyokütle

Fosil yakıtların enerji üretimi için kullanımı, uzun yıllar boyunca birikmiş karbonun kısa süreler içinde atmosfere salınması sebebiyle atmosfer dengesini bozmakta ve sera gazı emisyonlarını artırmaktadır. Ancak biyokütle kaynakları, kaynağın oluşması ve tüketilmesi arasında geçen sürenin çok uzun olmaması sebebiyle atmosferdeki karbon dengesini bozmamaktadır. Özellikle bitkisel biyokütlelerin büyümesi sırasında bitkilerin fotosentez ile $O_2$ üretmesi, yakılması ile açığa çıkan $CO_2$'i yaşam döngüsü içinde nötrlemektedir [23].

Biyokütle yakıtı, selüloz, hemiselüloz ve lignin isimli üç ana bileşenden oluşmaktadır. Tipik olarak daha yüksek uçucu madde konsantrasyonu ve daha düşük karbon içeriği nedeniyle geleneksel fosil yakıtlardan daha düşük bir ısıtma değerine sahiptir. Ayrıca biyokütle kaynakları oldukça çeşitlidir. Kimyasal içerik ve fiziksel yapılardaki bu farklılıklar biyokütlenin yanma davranışını önemli ölçüde etkilemektedir [24].

### 3.1.1. Biyokütle kaynakları

Biyokütle, yenilenebilir olması, her yerde yetiştirilebilmesi ve özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması nedeniyle uygun ve önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Enerji kaynaklarının kısıtlı olduğu, tarıma dayalı ülkelerde biyokütlenin önemi artmaktadır. Biyokütlenin iki temel kaynağı vardır. Bunlardan birincisi yakıt amaçlı yetiştirilen enerji bitkileri, ikincisi ise atıklardır. Enerji bitkileri, odunsu bitkiler ve tarımsal bitkilerden oluşmaktadır. Atıklar ise ağaç kalıntıları, ormancılık

atıkları, bitki atıkları, kanalizasyon, belediye katı atıkları ve hayvansal atıklardır [25]. Bunlardan bazıları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Biyokütle türleri ve kaynakları [24,25]

| **Biyokütle Türü** | **Kaynaklar** |
|---|---|
| Odun ve Odunsu Bitkiler | Enerji ormanları ve diğer ağaç artıkları |
| Yağlı Tohum Bitkileri | Ayçiçeği, pamuk, kolza, soya, aspir vb. |
| Otlar ve Çiçekler | Yonca, bambu, mischantus, switchgrass, devedikeni vb. |
| Elyaf Bitkileri | Keten, kenevir, sorgum vb. |
| Bitkisel Artıklar | Saplar, dal, yaprak, ağaç kabuğu, cips, talaş, kök, kabuk vb. |
| Hayvansal ve İnsansal Atıklar | Kemikler, etli yemek atıkları, tavuk dışkısı, gübreler vb. |
| Bozulmuş ve Endüstriyel Atıklar | Katı şehir atıkları, kanalizasyon çamuru, atıktan türetilmiş yakıt (RDF), hastane atıkları, kağıt atıkları, karton kutular vb. |

### 3.1.2. Biyokütle yakıtlarının önemli avantajları ve dezavantajları

Fosil yakıtların yerini en kolay alabilecek yenilenebilir enerji kaynağı biyokütleler olduğundan mevcut fosil yakıtlı sistemlerin dönüşümü için yapılan çalışmalar artmaktadır [26].

### 3.1.3. Biyokütle yanması

Yanma, türbülanslı akış hareketlerinin ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi ile ısı ve kütle transferlerinin gerçekleştiği karmaşık bir olaydır. Biyokütle yakma sistemlerinin tasarımını yapmak ve var olan fosil yakıtlı sistemlerin dönüşümünü sağlamak için yanma olayının doğru anlaşılması önem taşımaktadır. Jenkins vd. [27], hava ortamında biyokütle yanması için genel formülü şu şekilde vermişlerdir:

$$C_{x1}H_{x2}O_{x3}N_{x4}S_{x5}Cl_{x6}Si_{x7}K_{x8}Ca_{x9}Mg_{x10}Na_{x11}P_{x12}Fe_{x13}Al_{x14}Ti_{x15} + nH_2O$$
$$+n_2(1+e)(O_2+3,76N_2) = n_3CO_2 + n_4H_2O + n_5O_2 + n_6N_2 + n_7CO + n_8CH_4 + \quad (3.1)$$
$$n_9CH_4 + n_{10}NO + n_{11}NO_2 + n_{12}SO_2 + n_{13}HCl + n_{14}KCl + n_{15}K_2SO_4 + n_{15}C + ...$$

Biyokütle yakıtlar, yapısı gereği organik bileşenleri içinde barındırmaktadır. Buna ek olarak cüruf ve kirlenmeye yol açan ağır metaller gibi birçok inorganik bileşeni de barındırmaktadır. Yanma prosesi sonucunda CO, $CO_2$, $H_2O$ ve $CH_4$ başta olmak üzere farklı hidrokarbonlar, azot ve kükürt oksitleri açığa çıkmaktadır. Reaksiyonun ürün tarafında ayrıca alkali klorürler, sülfatlar, karbonatlar ve silikatlar gibi inorganik ürünler de bulunabilmektedir. Eş. 3.1 ile yanma ürünleri genelleştirilerek gösterilmiştir ve genelleştirilmiş halinden daha fazla yanma ürünü görülebileceği üç nokta ile ifade edilmek istenmiştir. Birçok biyokütlede kükürt (S) ya çok düşük miktarda bulunmakta ya da hiç bulunmamaktadır [28]. Bu da geleneksel fosil yakıtlara kıyasla yanma sonucu oluşan emisyonun çeşit ve miktar olarak düşük olacağı anlamına gelmektedir.

Yanma, dört temel adımdan oluşmaktadır: Piroliz, uçucu salınımı, gazlaştırma ve karbon yanması [29].

## 3.2. Akışkan Yatakta Yanma

Akışkan yataklı buhar kazanı tasarımında yakıt tipine bağlı olarak yapılan ısıl tasarım hesaplaması ve yatak içi katı-gaz etkileşimini inceleyen yatak hidrodinamiği tasarımı önemli iki tasarım adımlarıdır.

### 3.2.1. Yanma hesaplamaları

Buhar üretiminin tasarım, çalışma ve performans adımlarının bağımlı olduğu en önemli parametre (yakıt konusunda daha esnek olan akışkan yataklı kazanlar dahil) yakıt seçimidir. Bu nedenle herhangi bir tasarım, yakıtın belirlenmesi ile başlamalıdır [30].

Yanma hesaplamaları, yanma reaksiyonlarının stokiyometrik hesaplamalarına dayanmaktadır. Birim yakıt kütlesine bağlı olarak (kütlesel temelde), yakıtın elementer analizi ve stokiyometrik yanma kurallarına bağlı olarak türetilen yanma denklemleri Eş. 3.2 – Eş. 3.19 ile verilmiştir [30].

Alt ısıl değer ($H_u$), üst ısıl değerden ($H_o$) yanma gazındaki su buharının yoğuşma ısısının çıkarılmasıyla elde edilen değerdir. Denklemdeki H, hidrojen oranını, M, nem oranını ifade etmektedir. r ise buharın faz değişim esnasındaki gizli ısısını ifade etmektedir.

Üst ısıl değerin hesaplanması [kj/kg]

$$H_o = H_u - r\left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100}\right) \tag{3.2}$$

Teorik yanmada oksijen gereksinimi [$Nm^3$/kg-yakıt]

$$O_{2\min} = 1,866 * \frac{C}{100} + 5,56 * \frac{H}{100} + 0,7 * \frac{S}{100} - 0,7 * \frac{O}{100} \tag{3.3}$$

Teorik yanmada hava gereksinimi [$Nm^3$/kg-yakıt]

$$V_{Hth} = \left(\frac{1}{0,21}\right) * O_{2\min} \tag{3.4}$$

Gerçek yanmada hava gereksinimi [$Nm^3$/kg-yakıt]

$$V_H = n * V_{Hth} \tag{3.5}$$

Hava fazlalık katsayısı

$$n = \frac{21}{21 - O_2} \tag{3.6}$$

Teorik yanmada kuru yanma gazı miktarları [$Nm^3$-G/kg-yakıt]

$$V_{Gkrth} = V_{CO2} + V_{SO2} + V_{NG} + V_{NH} \tag{3.7}$$

$$V_{CO2} = 1,866 * \frac{C}{100} \tag{3.8}$$

$$V_{SO2} = 0,7 * \frac{S}{100} \tag{3.9}$$

$$V_{NY} = 0,8 * \frac{N}{100} \tag{3.10}$$

$$V_{NH} = 0,79 * V_{Hth} \tag{3.11}$$

Teorik yanma gazı nem miktarı [$Nm^3$-$H_2O$/kg-yakıt]

$$V_{H_2O} = 11,1 * \frac{H}{100} + 1,24 * \frac{W}{100} + 1,6 * V_{Hth} * 0,013 \tag{3.12}$$

Teorik yanmada yaş yanma gazı miktarı [$Nm^3$-G/kg-yakıt]

$$V_{gyth} = V_{gkrth} + V_{H_2O} \tag{3.13}$$

Gerçek yanmada yaş yanma gazı miktarı [$Nm^3$-G/kg-yakıt]

$$V_{gy} = V_{gyth} + (n-1) * V_{Hth} + (n-1) * V_{Hth} * 0,013 \tag{3.14}$$

Gerçek yanmada kuru yanma gazı miktarı [$Nm^3$-G/kg-yakıt]

$$V_{gkr} = V_{gy} - V_{H_2O} \tag{3.15}$$

Toplam yakma havası ve yanma gazı miktarı

$$V_{H_0} = M_y * V_H \tag{3.16}$$

$$V_{G_0} = M_y * V_{gy} \tag{3.17}$$

Herhangi bir T [°C] sıcaklığında yakma havası ve yanma gazı miktarı

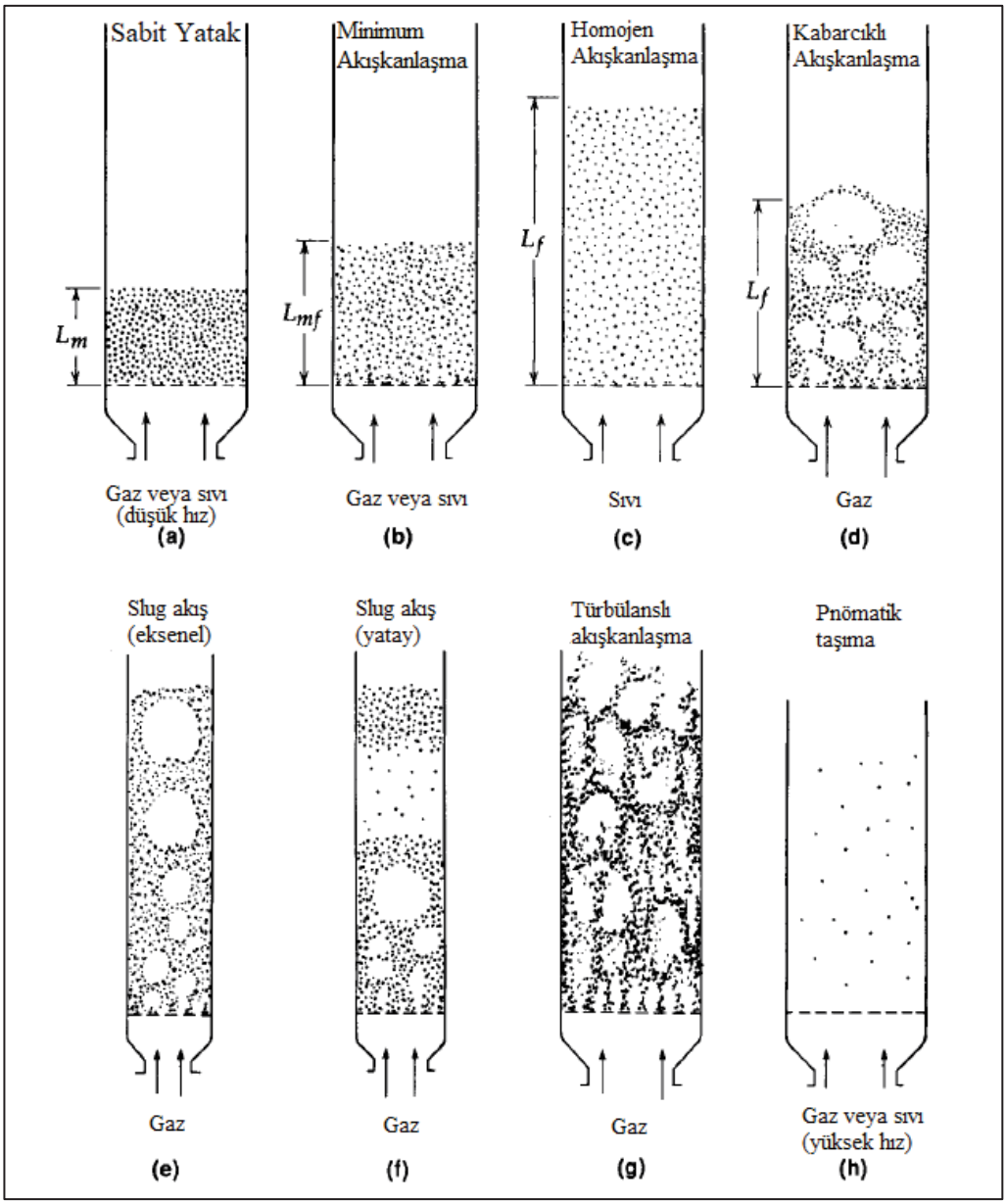
$$V_H = V_{H_0} * \frac{273 + T}{273} \tag{3.18}$$

$$V_G = V_{G_0} * \frac{273 + T}{273} \tag{3.19}$$

Burada n, tam yanma için gereken yakıt-hava karışımının kusurlarını telafi etmek için eklenen fazla havanın, hava fazlalık katsayısını tanımlamaktadır. Akışkan yataklı yakıcılar için önerilen hava fazlalık katsayısı 1,3 – 1,5 aralığındadır [30]. Literatürdeki çalışmalarda ve endüstrideki örneklerde akışkan yataklı yakıcılarda hava fazlalık katsayısı genellikle 1,4 olarak kabul edilmektedir [2].

### 3.2.2. Akışkan yatak hidrodinamiği

Katı partiküllerin, gaz veya sıvı ortamda akışkan benzeri bir yapıya dönüştürülmesine akışkanlaştırma adı verilmektedir. Yatak altından beslenen akışkan, düşük hızlarda besleniyorsa partiküller arası boşluklardan süzülerek, Şekil 3.1(a)'da görüldüğü gibi yatağın sabit yatak özelliği göstermesine sebep olacaktır. Akışkan hızı arttıkça partiküller ve akışkan arasındaki sürtünme kuvvetinin, partiküllerin ağırlığını dengelediği bir noktaya ulaşılmaktadır. Bu noktada bitişik partiküller arasındaki basma kuvvetinin dikey bileşeni kaybolmaktadır ve yatağın herhangi bir bölgesindeki basınç düşüşü o bölgedeki akışkan ve partiküllerin ağırlığına eşit olmaktadır. Bahsedilen bu nokta, minimum akışkanlaşma noktası olarak kabul edilmektedir ve bu noktadaki boş kolon gazı hızı, minimum akışkanlaşma hızı ($U_{mf}$) olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.1'de sabit yatak hızından yataktaki tüm malzemenin taşındığı (pnömatik taşıma) hız olan terminal hıza ($U_t$) kadar farklı akışkanlaşma adımları gösterilmektedir [31].




Şekil 3.1. Akışkan hızına bağlı olarak farklı akışkanlaşma rejimleri[31]

Akışkan hızı yükseldikçe partiküllerin yatağın üst bölgesine taşındığı, kabarcıkların yerini dağınık gaz hareketlerine bıraktığı türbülanslı akışkan yatak rejimi görülmektedir. Partiküllerin büyük oranda yatağın üst bölgesine taşınması kararlı durumun oluşmasını zorlaştırdığından yataktan taşınan partiküllerin tekrar yatağa döndürülmesi gerekmektedir. Siklonlar ya da farklı engeller ile partiküllerin geri beslendiği bu tür sistemlere dolaşımlı akışkan yatak (DAY) adı verilmektedir.

Dolaşımlı akışkan yataklarda kullanılan çeşitli separatör tipleri ve çalışma performansları Çizelge 3.2'de verilmiştir. DAY'lı sistemlerde en yaygın kullanılan separatör tipi yüksek performanslı siklonlardır. Ancak maliyet, çalışma şartları ve kullanım alanı gibi

sebeplerden ötürü U-kiriş veya çeşitli tüpler ile oluşturulan çarpma separatörleri de kullanılmaktadır [30].

Çizelge 3.2. Çeşitli separatör tiplerinin çalışma performansları[30]

| **Separatör Tipi** | **S Şekilli** | **Kanal tüpler** | **U-kiriş** | **Finli tüp** | **Kare separatör** | **Siklon** | **İki kademeli separatör** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| |  |  |  |  |  |  |  |
| **Separatör verimi (%)** | 80-90 | 80-90 | 90-94 | 94-95 | 97-99 | 98-100 | >99 |
| **Basınç kaybı (mm$H_2O$)** | 20-40 | 10-30 | 20-30 | 10-25 | 80-120 | 150-200 | 90-150 |
| **Partikül çapı $d_p$ (mm)** | | 0,2-0,3 | 0,26 | 0,26 | 0,1-0,26 | 0,1-0,3 | 0,26 |
| **Sirkülasyon oranı** | 1-2 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 6-20 | >10 | >20 |

Minimum akışkanlaşma hızı ($U_{mf}$)

Akışkanlaşmanın başlaması için gereken minimum şart, yukarı yönlü giden havanın sürükleme kuvvetinin partikül ağırlığına eşit olma durumudur [31].

$$\begin{pmatrix} yatak\ boyunca \\ basınç\ düşüşü \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} yatak \\ kesit\ alanı \end{pmatrix} = (yatak\ hacmi) * \begin{pmatrix} katı \\ partikül\ kesri \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} katı\ partiküllerin \\ özgül\ ağırlığı \end{pmatrix}$$

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)\left(\frac{g}{g_c}\right) \tag{3.20}$$

Minimum akışkanlaşma şartı için gereken hız ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \mathrm{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \mathrm{Re}_{p,mf} = Ar \tag{3.21}$$

Reynold sayısı ($Re_{p,mf}$):

$$\mathrm{Re}_{p,mf} = \frac{d_p \rho_g U_{mf}}{\mu} \tag{3.22}$$

Arşimet sayısı (Ar):

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \tag{3.23}$$

$U_{mf}$ hesaplaması için farklı boşluk kesri ve Reynold sayısı aralıklarında literatürde farklı korelasyonlar geliştirilmiştir. Korelasyonlar için kullanılan genel formül aşağıdaki eşitliklerde, farklı araştırmacıların sunmuş olduğu katsayılar ise Çizelge 3.3'te verilmiştir [31,32].

$$K_1 \mathrm{Re}_{p,mf}^2 + K_2 \mathrm{Re}_{p,mf} = Ar \tag{3.24}$$

$$\mathrm{Re}_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \tag{3.25}$$

Çizelge 3.3. Çeşitli araştırmacıların bulmuş olduğu $K_1$ ve $K_2$ sabitleri[31,32]

| **Araştırmacılar** | **$K_2/2K_1$ ($C_1$)** | **$1/K_1$ ($C_2$)** |
|---|---|---|
| Wen-Yu (1966) | 33,7 | 0,0408 |
| Richardson (1971) | 25,7 | 0,0365 |
| Saxena-Vogel (1977) | 25,3 | 0,0571 |
| Babu vd. (1978) | 25,3 | 0,0651 |
| Grace (1982) | 27,2 | 0,0408 |
| Chitester vd. (1984) | 28,7 | 0,0494 |

Partiküllerin terminal hızı ($U_t$)

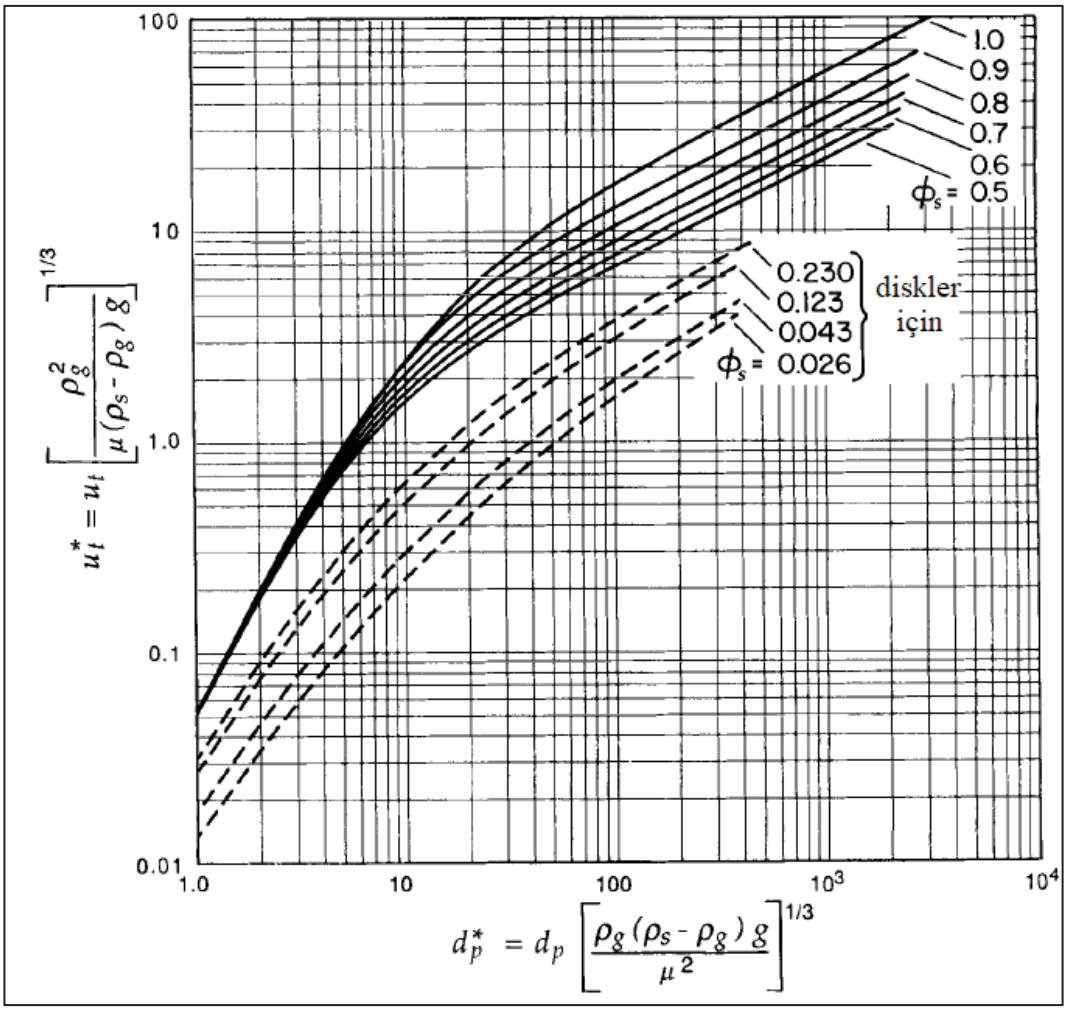
$d_p$ çapındaki bir partikülün akışkan içinde düşüş yapacağı son hız (terminal hız) $U_t$ şu eşitlik ile tahmin edilebilir.

$$u_t = \left[ \frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \tag{3.26}$$

$C_D$, Haider ve Levenspiel'in genelleştirmiş olduğu, deneysel olarak belirlenmiş sürüklenme katsayısıdır [33]:

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left[1 + (8{,}1716e^{-4{,}0655\phi_s})\,\mathrm{Re}_p^{0{,}0964+0{,}5565\phi_s}\right] + \frac{73{,}69(e^{-5{,}0748\phi_s})\,\mathrm{Re}_p}{\mathrm{Re}_p + 5{,}738e^{6{,}2122\phi_s}} \tag{3.27}$$

Haider ve Levenspiel[33], terminal hızın direkt olarak bulunabilmesi için fiziksel değerlerin kullanılarak denklemlerin basitleştirildiği bir grafik sunmuşlardır. Şekil 3.2'de boyut, küresellik ve özkütle gibi bazı fiziksel özelliklere dayalı terminal hız hesaplama çizelgesi verilmiştir.




Şekil 3.2. Partiküllerin akış içinde düşüş yapacağı terminal hız hesaplaması için diyagram[33]

Burada $d_p^*$, $u_t^*$ ve $u^*$ birimsiz partikül çapı ve birimsiz hızları tanımlamaktadır.

$$d_p^* = d_p\left[\frac{\rho_g(\rho_s-\rho_g)g}{\mu^2}\right]^{1/3} = Ar^{1/3} = \left(\frac{3}{4}C_D\,\mathrm{Re}_p^2\right)^{1/3} \tag{3.28}$$

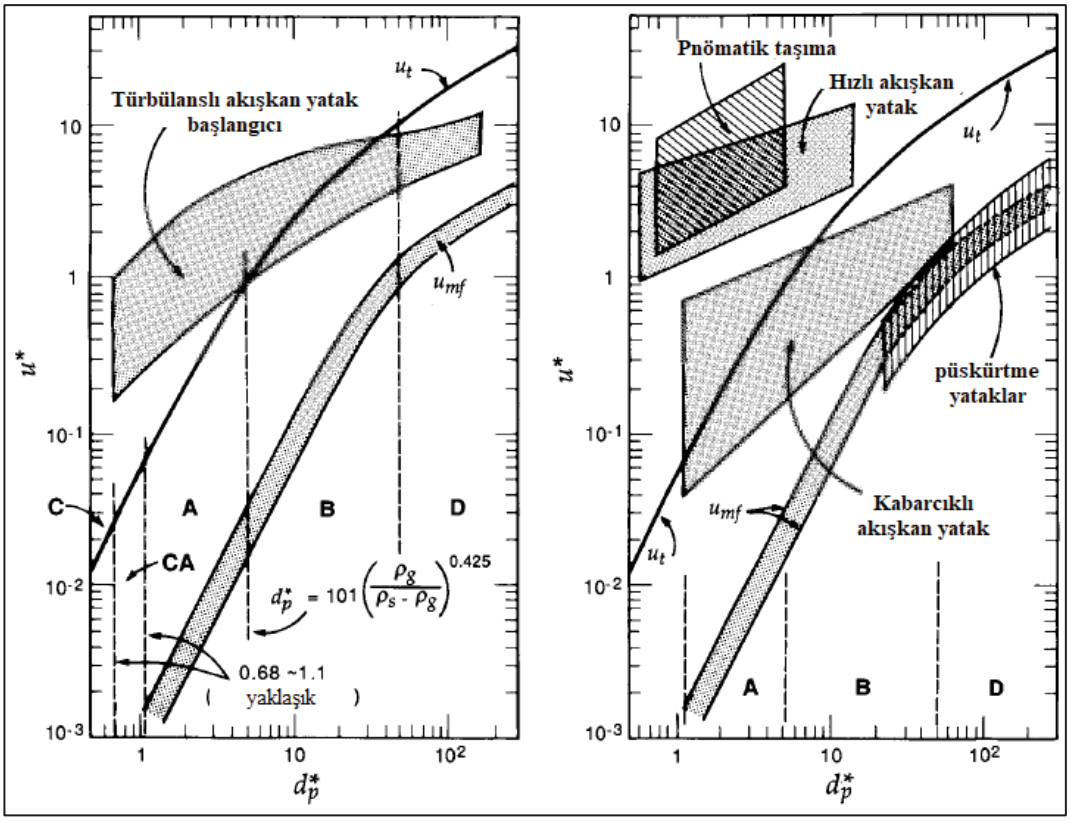
$$u^* = u\left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s-\rho_g)g}\right]^{1/3} = \frac{\mathrm{Re}_p}{Ar^{1/3}} = \left(\frac{4}{3}\frac{\mathrm{Re}_p}{C_D}\right)^{1/3} \tag{3.29}$$

$$u_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^2)^2} + \frac{2{,}335 - 1{,}744\phi_s}{(d_p^*)^{0{,}5}}\right]^{-1}, \quad 0{,}5 < \phi_s < 1 \tag{3.30}$$

Akışkanlaşma rejiminin belirlenmesi

Akışkanlaşma rejiminin belirlenmesi veya tasarımı yapılacak akışkanlaşma rejimine uygun partikül boyutu ve akış hızı seçilmesi akışkan yataklı yakıcılarda en önemli tasarım

adımlarından biridir. Literatürde farklı parametrelere bağlı olarak üretilmiş akış rejimi diyagramları ve çizelgeleri bulunmaktadır. Kunii ve Levenspiel [31], parçacık tipine ve yatak hızına bağlı olarak Grace [34] ve Bi ve Grace'te [35] bulunan akışkanlaşma rejimi diyagramlarına literatürdeki farklı bilgileri de adapte ederek Şekil 3.3'teki gibi bir diyagram üretmişlerdir. Diyagramda yatay eksende bulunan A, B, C ve D bölgeleri, kullanılan partikülün Geldart sınıflandırmasını belirtmektedir.




Şekil 3.3. Farklı parçacık boyutu ve yatak hızına bağlı olarak akışkanlaşma rejiminin belirlenmesi için Kunii ve Levenspiel tarafından türetilmiş diyagram[31]

### 3.3. Çok Fazlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Biyokütle yanması ile ilgili araştırmalar son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir. Endüstriyel ölçekli tesislerde yapılan deneyler ilk başta birincil çalışma yöntemi olarak görülmekle birlikte, kısa bir süre sonra deneylerin ekonomik olarak maliyetli, zaman alıcı ve teknik açıdan zor olduğu ve sonuçların deney yapılan tesise özgü olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra, laboratuvar ölçeğinde tasarlanan pilot ölçekler yaygın olarak benimsenmiş ve kısmen bu sorunlar çözülmüştür. Ancak, pilot ölçekte alınan sonuçlar çok daha büyük ölçekteki gerçek tesisleri yansıtmakta zorlanmıştır.

Termodinamik denge yaklaşımı ile yapılan tasarımlar her ne kadar akışkan yataklı kazanların çalışma şartları ile ilgili analitik sonuçlar sunsa da kazanın herhangi bir bölgesinde oluşabilecek sorunları ve çalışma şartlarını daha kapsamlı gözlemleyebilmek için yeterli olmamaktadır. Topal'ın yapmış olduğu RDF yakıtlı bir akışkan yataklı buhar kazanının termal denge yaklaşımı ile tasarımı çalışmasında görüldüğü üzere, bu yaklaşım baca gazı konsantrasyonları ve debileri hakkında analitik sonuçlar vermektedir [2].

Çok fazlı sayısal akışkanlar dinamiği yönteminin geliştirilmesi ve yaygınlaşması ile birlikte deneysel ve endüstriyel ölçekli çalışmalarda büyük gelişmeler görülmüştür.

Katı ve gaz fazının sürekli akış olarak kabul edildiği Eulerian yaklaşımıyla oluşturulmuş iki akışkan modeli (TFM), çok fazlı HAD çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Akışkan yatak hidrodinamiğinin ve kimyasal tepkimelerin incelenmesinde çok sayıda çalışma yapıldığı, bilgi birikiminin yüksek olduğu ve hesaplama maliyetlerinin daha düşük olduğu göz önüne alındığında günümüzde hala TFM çalışmalarının yapıldığı görülmektedir.

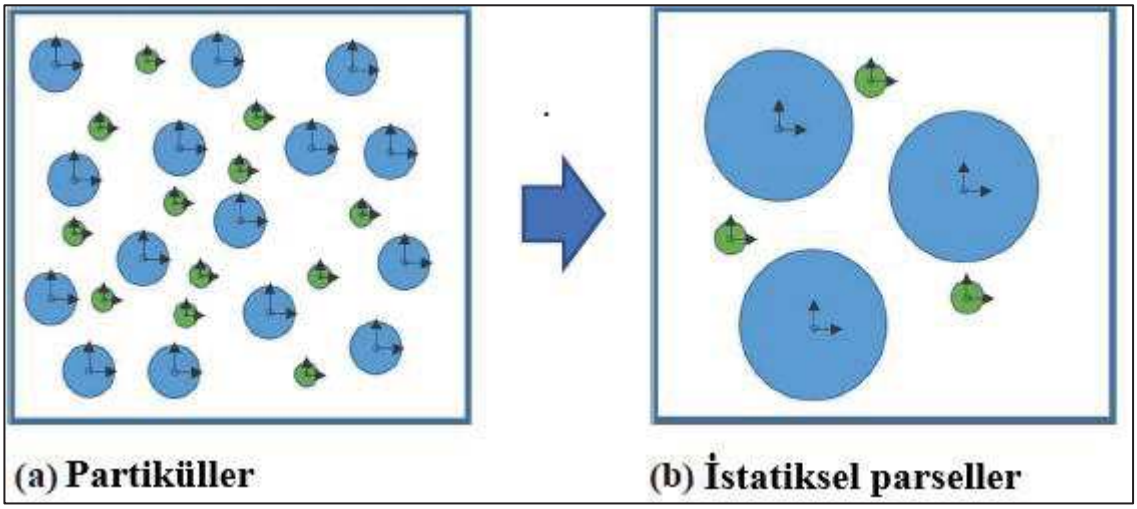
Katı fazını daha detaylı incelemek için her bir partikülü ayrık tanecikler olarak kabul eden Lagrangian yaklaşımı ile Ayrık Elemanlar Modeli (DEM) geliştirilmiştir. Katı parçacıklar arası etkileşim için yay – sönümleyici modelini kullanan DEM [36], partikül sayısı arttıkça ve geometri büyüdükçe hesaplama maliyetlerinin çok yükseldiği bir yöntemdir [37],[38]. DEM modelinin endüstriyel ölçekli çalışmalarda kullanılması çok güçlü bilgisayar ihtiyacı doğurduğundan literatürde Lagrangian yaklaşımı ile yapılacak çözümlerin maliyetini düşürecek yöntemler üzerine birçok çalışma yapılmıştır.

DEM modelinin yüksek maliyetini hafifletmek için literatürde geliştirilen ve kullanılan yöntemlerin içinde en çok kullanılanlar iri taneli DEM (CGDEM) [39] ve hücre içinde partikül (PIC) [40] modelleridir.

### 3.3.1. Hücre içinde partikül (PIC) modeli

Hücre içinde Partikül (PIC), ayrık eleman modelinde (DEM) olduğu gibi akışkan fazını Eulerian (sürekli) yaklaşımıyla, katı fazı ise Lagrangian (ayrık) yaklaşımıyla çözmek için oluşturulmuş bir modeldir. PIC modeli, katı partiküllerin her birini ayrı ayrı incelemek yerine aynı fiziksel özelliklere sahip partikülleri, akış içinde benzer hareketleri yapacağı

varsayımı ile istatistiksel parseller halinde takip eden bir yaklaşım kullanmaktadır [40]. Şekil 3.4, PIC modelleme konseptini göstermektedir.




Şekil 3.4. PIC modelinde, partikül ve parsel konsepti. a) partiküllerle doldurulmuş bir hücre b) her bir partikül türüne istatiksel ağırlık uygulandıktan sonra aynı hücre [40]

Şekil 3.4(a)'da mavi ve yeşil ile gösterilen partiküllere, partikül/parsel oranı istatistiksel ağırlık olarak uygulanmaktadır ve hücreler içinde Şekil 3.4(b)'deki gibi oluşturulmuş parseller takip edilmektedir.

İstatiksel yapısından kaynaklanan, partikülleri genelleştirmesi sonucu, partikül-partikül etkileşimleri için Newton mekaniğini yönetmek yerine model, katı hızını doğrudan etkileyen bir katı stres momentum kaynak terimi oluşturmaktadır [40,41]. Snider vd. [42], hareket denklemine izotropik partikül stres gradyanı eklendiğini belirtmişlerdir. Gaz fazı ivme terimleri ve diğer partikül terimlerinin hesaplanması, stres gradyanının hesaplanmasıyla birbirlerine bağlıdır. Hesaplanan stres gradyanı, daha sonra ayrık partiküllere interpole edilmektedir [42].

MFiX-PIC teori rehberine göre [40], PIC modeli kabulleri ve sınırlamaları aşağıdaki gibi verilmiştir:

- Partiküller ve istatiksel parseller küresel olarak kabul edilmektedir. Bu sebeple katı fazı küresel olarak kabul eden sürükleme modelleri kullanılmalıdır.
- İstatiksel parseller, her bir katı faz için ayrı ayrı tanımlanmalı ve ortalama yoğunluğu korumalıdır.

- İstatistiksel parseller matematiksel olarak tek bir nokta halinde tanımlanmaktadır. Herhangi bir yüzey özelliğine veya üç boyutlu fiziksel özelliklere sahip değildir.
- İstatiksel parseller izotermaldir.
- İstatistiksel parseller dönme hareketi yapmamaktadırlar.
- İstatistiksel parseller için model temel olarak çarpışmaları hesaplamamaktadır ve birbirinin içinden geçebileceğini kabul etmektedir. İstenirse eklenebilecek bir çarpışma sönümleme modeli de geliştirilmiştir. Çarpışma sönümleme modeli, ivme artırma veya azaltma esasına dayanmaktadır. O'Rourke vd. , çarpışma sönümleme modelinin ampirik sonuçlara dayandığını, geliştirilmesi gerektiğini ve kullanıldığı durumlarda deneysel olarak doğrulanması gerektiği sonucuna varmışlardır [43,44].
- İstatistiksel parseller, her zaman adyabatik duvar şartlarına maruz kalırlar.
- PIC modeli, partiküllerin hız değişikliklerini tahmin etmek için katı dağılım kesirlerine ihtiyaç duyduğundan, çok seyrek akışlarda kullanmak için uygun değildir. Her bir kafes hücrede, en az tek bir parsel bulunması gerekmektedir.
- İstatiksel parseller, 3 boyutlu yansıma yoluyla duvarlarla etkileşime girmektedirler.
- PIC modeli, iki boyutlu simülasyonlar için formülize edilmemiştir. Ancak, gerekirse, hesaplanmayan boyut için en az üç kafes hücre seçilerek psüdo-iki boyut simülasyonları yapılması önerilmektedir.
- PIC model sonuçları incelenirken katı hareketlerinin incelenmesinde hacimsel kesir kontürlerinin incelenmesi daha doğru sonuçlar vermektedir. Katıların Lagrangian (ayrık) yaklaşımla görselleştirilmesi, modelde kullanılan kabulün bir sonucu olarak (ve kullanılan istatiksel ağırlık ve kafes yapısına bağlı olarak) doğal olmayan görüntüler oluşturabilir. Bu durum, her zaman sonuçların yanlış olduğunu göstermemektedir.

Kadyrov vd. sirkülasyonlu akışkan yataklarda katı stres modelinin etkilerini iki boyutlu simülasyonlar ile araştırmışlardır ve katı stres parametrelerinin sıkı istif durumunda daha önemli hale geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca iki boyutlu PIC çalışmalarında gereken optimum kalınlık değerinin (psüdo-iki boyut çalışması için kullanılacak üçüncü boyut büyüklüğü) bir partikülün çapına eşit olduğu sonucuna varmışlardır [45].

### 3.3.2. Ayrıklaştırma

Sayısal analiz için gereken diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılması (diskritizasyon) işleminde kısmi diferansiyel denklemler lineer cebirsel denklemlere dönüştürülmektedir. Çözüm bölgesi içindeki bir hücrenin çeşitli değerlerini elde etmek için, üç boyutlu olarak komşu değerler dikkate alınmaktadır [46].

Ayrıklaştırma şemaları literatürde birinci dereceden ve yüksek dereceli olmak üzere farklı yaklaşımlarla oluşturulmuşlardır.

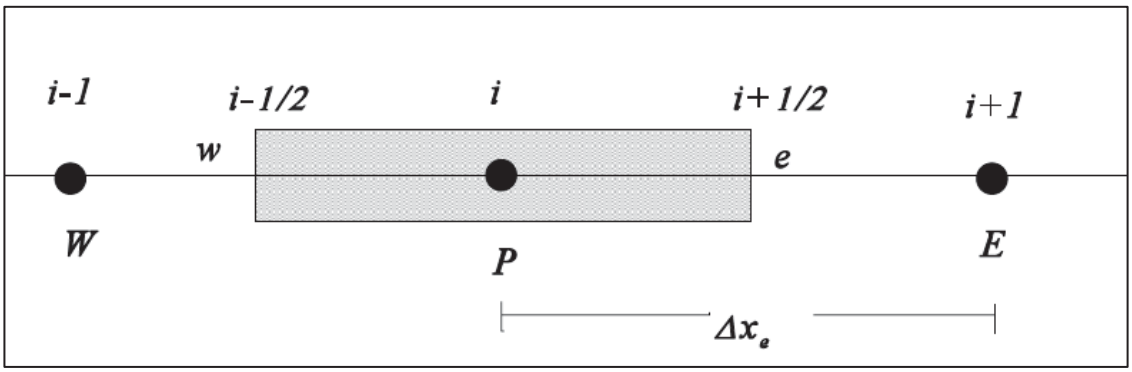
Akışkan yataklar konveksiyon baskın akışlar olduğundan konveksiyon ifadeleri isabetli şekilde ayrıklaştırılmalıdır. Birinci dereceden upwind şeması kullanmak konveksiyon ifadelerinin kararlı olmasını sağlarken difüzyon terimlerinde farka yol açmaktadır [47].

Birinci derece ayrıklaştırma şemaları

Taşınım denklemleri konveksiyon-difüzyon terimlerini içermektedir:

$$\rho u \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial}\left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \tag{3.31}$$

Sayısal şemanın kararlılığı ve doğruluğu için hesaplamalı akışkanlar dinamiği hesaplamalarında kontrol hacmi yöntemi tercih edilmektedir. Kontrol hacmi yönteminde kaba çözüm ağlarında bile uygun kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin türetilmesi sağlanmaktadır [48].




Şekil 3.5. Kontrol hacmi ve x-yönlü düğüm noktaları [48]

Konveksiyon ve difüzyon terimleri Şekil 3.5'teki gibi kontrol hacmi için hesaplanırsa Eş. 3.32 elde edilmektedir.

$$\int\left[\rho u\frac{\partial\phi}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)\right]dV=\left[\rho u\phi_e-\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e\right]A_e-\left[\rho u\phi_w-\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_w\right]A_w \tag{3.32}$$

Kontrol hacmi duvarındaki difüzyon terimlerinin hesaplanması ikinci dereceden doğruluk ile Eş. 3.33 ile hesaplanabilir.

$$\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e=\Gamma_e\frac{(\phi_E-\phi_P)}{\delta x_e}+O(\delta x^2) \tag{3.33}$$

Eş. 3.32'deki herhangi bir konveksiyon teriminin ayrıklaştırılması, kontrol hacmi duvarlarındaki ($\phi_e$ ve $\phi_w$) $\phi$ değerinin belirlenmesi anlamına gelmektedir.

$$\phi_e=\frac{\phi_E+\phi_P}{2} \tag{3.34}$$

Eş. 3.34, merkezi fark olarak adlandırılan basit bir interpolasyon işlemidir.

Eş. 3.35, zamandan bağımsız, bir-boyutlu, kaynak terimi olmayan bir akış için upwind şeması için analitik çözümü göstermektedir [48].

$$\frac{\phi-\phi_P}{\phi_E-\phi_P}=\frac{\exp\left(\frac{P_e x}{\delta x_e}\right)-1}{\exp(P_e)-1} \tag{3.35}$$

Ancak merkezi fark yönteminin yönden bağımsız oluşu, sayısal şemanın kararlılığıyla ilgili sorunlara sebep olmaktadır. Bu yüzden hesaplamaları kararlı hale getirmek için akış yönlü birinci dereceden upwind ayrıklaştırma şeması kullanılmaktadır.

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \text{u} \geq 0 \\ \phi_E & \text{u} < 0 \end{cases} \tag{3.36}$$

Merkezi farklar şemasında hata ikinci mertebeden olmaktadır[46,48]. Peclet sayısı (P), akışın ve akışkanın özelliklerine bağlıdır. Yüksek seviyedeki Peclet sayısı konveksiyonun baskın olduğunu gösterirken, düşük seviyedeki P difüzyon terimlerinin baskın olduğunu göstermektedir.

$$P_e = \frac{\rho u \Delta x_e}{\Gamma} \tag{3.37}$$

Eş. 3.35, farklı Peclet sayıları için çözüldüğünde, düşük Peclet sayılarında çözümün daha düşük isabette olduğu görülmüştür. Daha yüksek isabetli ayrıklaştırma için, yüksek maliyetli ancak maliyeti düşürecek hibrid yaklaşımlar sayesinde üstel şema kullanılabilir.

$$\rho u \phi_e - \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \rho u \left( \phi_P + \frac{\phi_P - \phi_E}{\exp(P_e) - 1} \right) \tag{3.38}$$

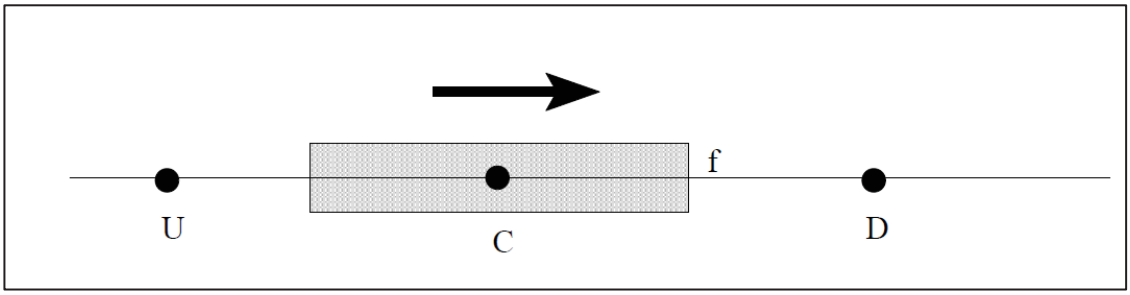
Upwind ayrıklaştırma şemasının konveksiyon terimi olarak kullanıldığı, difüz akı için kuvvet-yasası ayrıklaştırma şeması Eş. 3.39'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e &= A\left(|P_e|\right) \Gamma_e \frac{\left(\phi_E - \phi_P\right)}{\delta x_e} \\ A\left(|P_e|\right) &= \left[ (1 - 0{,}1|P|^5 \right] \end{aligned} \tag{3.39}$$

<u>Yüksek dereceli ayrıklaştırma şemaları</u>

Peclet sayısı büyüdükçe, A(P) sıfıra yaklaştıkça ve kuvvet-yasası şeması birinci derece upwind şemasına dönüşmektedir [46,48]. Şema, çok boyutlu, kaynağın önemli olduğu akışlarda isabetli sonuçlar vermemektedir. Yüksek dereceli ayrıklaştırma şemaları isabetliliği artırmakta önemli olsa da süreksizliğe sebep olacak yüksek ve düşük aşımlı salınımlara sebep olmaktadır. Bu salınımlar sebebiyle gerçek dışı ara sonuçların ortaya çıkması (birden büyük veya sıfırdan küçük hacim fraksiyonları gibi), yakınsama

problemlerine sebep olmaktadır. Şekil 3.6, akış yönüne bağlı olarak belirlenmiş düğümlerin ve kontrol hacminin konumlarını göstermektedir.




Şekil 3.6. Akış yönüne bağlı olarak belirlenmiş düğümlerin konumu [48]

Ayrıklaştırılmış denklemlerin, daha yüksek dereceli metotların mevcut kodlara eklenmesini kolaylaştırmak için Leonard ve Mokhtari, down wind faktörünü önermişlerdir [49].

Önerilen faktörün ayrıklaştırma için kullanılması ile ilgili yöntem aşağıdaki gibi verilmiştir:

1. $\phi_f$ için upwind metodu ile yüksek dereceli, çok boyutlu hesaplama yapılır.
2. Eş. 3.40'taki gibi tanımlanan bir down wind faktörü tanımlanır.

$$dwf^* = \frac{\phi_f - \phi_C}{\phi_D - \phi_C} = \frac{\tilde{\phi}_f - \tilde{\phi}_C}{1 - \tilde{\phi}_C} \tag{3.40}$$

3. dwf değerinin elde edilebilmesi için $dwf^*$ değerinin monotonik bölgede sınırlandırılması gerekmektedir. Down wind faktörünün bir fonksiyonu olarak evrensel sınırlayıcı belirlenmelidir [49].
4. $\phi_f$ için yeni değer Eş. 3.41 ile hesaplanmalıdır.

$$\phi_f = dwf\,\phi_D + (1 + dwf)\,\phi_C \tag{3.41}$$

Ayrıklaştırma şemaları için gereken down wind faktörü (dwf) Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Ayrıklaştırma şemalarının formülasyonu için down wind faktörleri [48]

| **Ayrıklaştırma Şeması** | **Down wind faktörü** $\left(\theta \equiv \frac{\tilde{\phi}_C}{\left(1-\tilde{\phi}_C\right)}\right)$ |
|---|---|
| Birinci dereceden upwind | 0 |
| Merkezi farklar | 0,5 |
| İkinci derece upwind | $\frac{1}{2}\theta$ |
| TVD şemaları | 0 |
| Van Leer | $\tilde{\phi}_C$ |
| Minmod | ½ max[0, min(1, $\theta$)] |
| MUSCL | ½ max[0, min(2$\theta$, 0,5+0,5$\theta$, 2)] |
| UMIST | ½ max[0, min(2$\theta$, 0,75+0,25$\theta$, 2)] |
| SMART | ½ max[0, min(4$\theta$, 0,75+0,25$\theta$, 2)] |
| Superbee | ½ max[0, min(1, 2$\theta$), min(2, $\theta$)] |
| ULTRA-QUICK | $\frac{\theta}{2}$ $\quad \tilde{\phi}_C < 0$<br>$\left(\frac{1}{c}-1\right)\theta$ $\quad 0 \le \tilde{\phi}_C < \frac{3c}{8-6c}$<br>$0,375+0,125\theta$ $\quad \frac{3c}{8-6c} \le \tilde{\phi}_C < \frac{5}{6}$<br>$1$ $\quad \frac{5}{6} \le \tilde{\phi}_C \le 1$<br>$0,5$ $\quad \tilde{\phi}_C > 1$ |

# 4. BİYOKÜTLE YAKITLI BİR DAY BUHAR KAZANI YANMA ODASI ANALİZİ VE MFIX-PIC İLE TASARIM İYİLEŞTİRMESİ

Yürütülen çalışma kapsamında 62 bar basınçta, 450 °C sıcaklıkta 50 t/h buhar üreten bir akışkan yataklı buhar kazanı ısıl tasarımı yapılmıştır. Daha sonra Türkiye'de, Marmara Bölgesi'nde, orman atıklarından üretilmiş odun cipsi yakıtı yakan bir güç santrali incelenmiş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile modellenmiştir. Tasarım değerleri ve deneysel sonuçlar dikkate alınarak yapılan sayısal çözüm doğrulamasının ardından çeşitli tasarım iyileştirmeleri modellenerek, MFiX paket programı ile sayısal olarak çözülmüştür. Deneysel sonuçlar için faydalanılan buhar kazanı, U-kiriş separatörler ile iç partikül dolaşımının sağlandığı endüstriyel ölçekli, akışkan yataklı bir buhar kazanıdır.

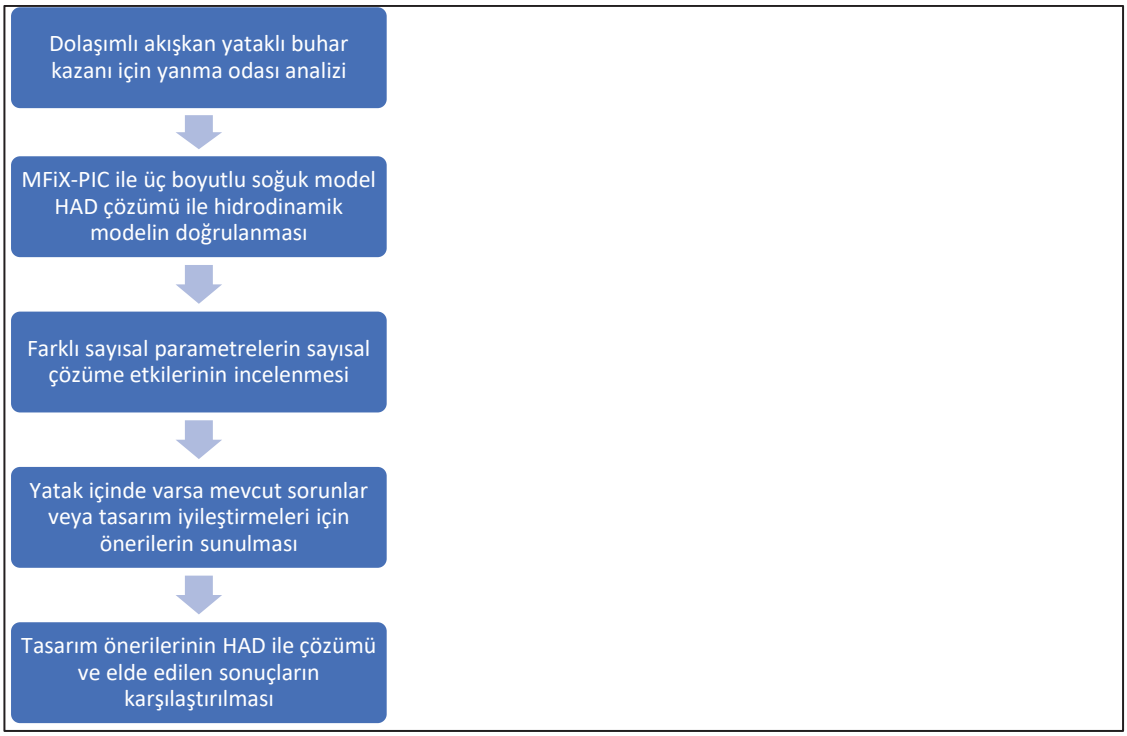
Kök, dal gibi orman atıkları ve bu atıklardan üretilmiş odun cipsi Resim 4.1'de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Orman atıklarından üretilmiş biyokütle; ağaç kökleri ve diğer atıklar (solda), parçalanmış ve yakmaya hazır hale getirilmiş odun cipsleri (sağda)

Sayısal çalışmada çok-fazlı hücre içinde partikül (PIC) metodu ile üç boyutlu olarak, santralin kazan bölümü, hidrodinamik ve yanma reaksiyonları açısından incelenmiştir. İlk aşamada hidrodinamik çözümü doğrulamak için sabit sıcaklıkta soğuk model çözümü yapılmıştır. Hidrodinamik yapıya sayısal parametrelerin etkisini incelemek için farklı sayısal parametreler (kafes hücre sayısı, farklı sürükleme modelleri, PIC parametreleri, vb.) ile farklı çözümler denenmiş ve karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada yatak içinde mevcut veya muhtemel sorunlar incelenmiş ve çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur. Soğuk model

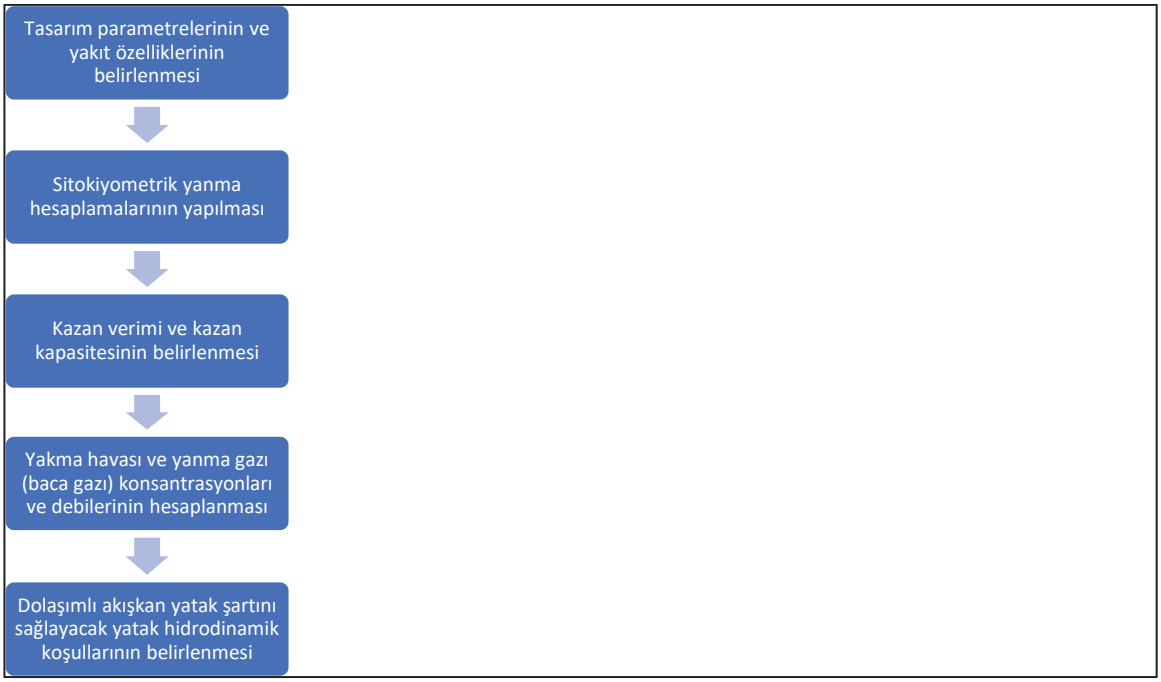
çözümü için yanma gazlarının analitik olarak hesaplanarak tanımlandığı, psüdo-yanma sınır şartları kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise elde edilen sonuçlar mevcut durumla ve diğer sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca süre ve işlemci kullanımı açısından maliyetler, farklı nümerik şemalarla karşılaştırılarak sunulmuştur. Tez çalışması boyunca yapılan tasarım ve sayısal çözüm adımları genelleştirilmiş olarak Şekil 4.1'de verilmiştir.




Şekil 4.1. Tez çalışması için yapılan tasarım ve sayısal analiz adımları

## 4.1. Dolaşımlı Akışkan Yataklı Buhar Kazanı Yanma Odası Analizi

Buhar kazanı tasarımında en önemli adım yakıtın belirlenmesi ve yakıta bağlı olarak yanma şartlarının hesaplanmasıdır. Bu bölümde yakıta bağlı olarak stokiyometrik yanma hesaplamaları yapılarak gerekli yakıt besleme debisi ve yakma havası debisi belirlenmiştir. Yanma şartlarına uygun debiler belirlendikten sonra dolaşımlı akışkan yatak şartlarını sağlayacak yatak malzemesi, miktarı ve yatak geometrisi belirlenmiştir. Şekil 4.2'de yanma odası tasarımı için uygulanan adımlar gösterilmiştir.




Şekil 4.2. Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı yanma odası tasarım adımları

### 4.1.1. Yanma hesapları

Yanma hesapları; tasarım parametreleri ve yakıtın kaba, elementer analizleri dikkate alınarak yakıtın yanmadaki rolünü ve sonuçlarını içermektedir.

Yakıt ısıl değerinin belirlenmesi

Bir buhar kazanının ısıl tasarımının yapılabilmesi için, kullanılacak yakıtın içeriğinin bilinmesi gerekmektedir. Yakıtın ısıl değerinin belirlenmesi için kaba analiz ve elementer analiz sonuçlarına göre teorik bir hesaplama yapılabilmekte veya deneysel yöntemler kullanılabilmektedir. Çizelge 4.1'de tez çalışmasında kullanılan odun cipsine ait elementer analiz ve kaba analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Odun cipsi elementer analizi ve kaba analizi

| **Elementer Analiz** | **Odun Cipsi 1 (%50)** | **Odun Cipsi 2 (%50)** |
|---|---|---|
| Karbon (C) | %46,56 | %38,41 |
| Hidrojen (H) | %4,9 | %4,65 |
| Kükürt (S) | 0 | 0 |
| Azot (N) | %0,62 | %0,68 |
| Oksijen (O) | %30,99 | %37,15 |
| Klor (Cl) | 0 | 0 |
| Kül (A) | | |
| Üst Isıl Değer ($H_o$) | 4157 kcal/kg | 3825 kcal/kg |
| Alt Isıl Değer ($H_u$) | 3834 kcal/kg | 3502 kcal/kg |

Buhar kazanına giren suyun giriş ve çıkış entalpilerinin belirlenmesi

Buhar kazanlarında, akışkan yatakta kızgın buhara dönüştürülecek su, besleme suyu ön ısıtma işlemi ile ekonomizörden ($P_{eko}$, $T_{eko}$, $h_{eko}$) su duvarlarına beslenmektedir. Doymuş sıvı noktasında ($P_{buhG}$, $T_{buhG}$, $h_{buhG}$) ya da ısıtılarak doymuş sıvı sıcaklığına getirilen su, yatak ısısını çekerek önce doymuş buhara ($P_{buhÇ}$, $T_{buhÇ}$, $h_{buhÇ}$) dönüştürülmektedir. Doymuş buhar ise kızdırıcı bölgesinde sabit basınçta ısıtılmaya devam ederek kızgın buhara ($P_{kız}$, $T_{kız}$, $h_{kız}$) dönüştürülmekte ve elektrik üretimi için buhar türbinlerine aktarılmaktadır. Buhar kazanı bölümleri için belirlenen basınç ve sıcaklıklara bağlı olarak suyun entalpi değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanının su bölümleri için belirlenmiş sıcaklık ve basınç değerlerine bağlı olarak entalpi değerleri

| **Parametre** | **Değer** |
|---|---|
| Buharlaştırıcı girişi | |
| $P_{buhG}$ | 62 bar |
| $T_{buhG}$ | 277,73 °C |
| $h_{buhG}$ | 1225,06 kj/kg |
| Buharlaştırıcı çıkışı | |
| $P_{buhÇ}$ | 62 bar |
| $T_{buhÇ}$ | 277,73 °C |
| $h_{buhÇ}$ | 2782,37 kj/kg |
| Kızdırıcı çıkışı | |
| $P_{kız}$ | 62 bar |
| $T_{kız}$ | 450 °C |
| $h_{kız}$ | 3300,01 kj/kg |

Kazan ısıl kapasitesinin belirlenmesi

Buhar kazanının ısıl kapasitesi, buhar debisine ve sisteme giren suyun entalpi değişimine bağlıdır. Buhar kazanının ısıl kapasitesi, $Q_k$:

$$Q_k = M_b * (h_{kiz} - h_{eko}) \tag{4.1}$$

Yakıt miktarının belirlenmesi

Buhar kazanının belirlenen ısıl kapasiteye ulaşabilmesi için yatağa beslenmesi gereken yakıt debisi, $M_y$:

$$M_y = \frac{Q_k}{H_u * \eta} \tag{4.2}$$

Yanma gazlarının analitik hesaplamaları

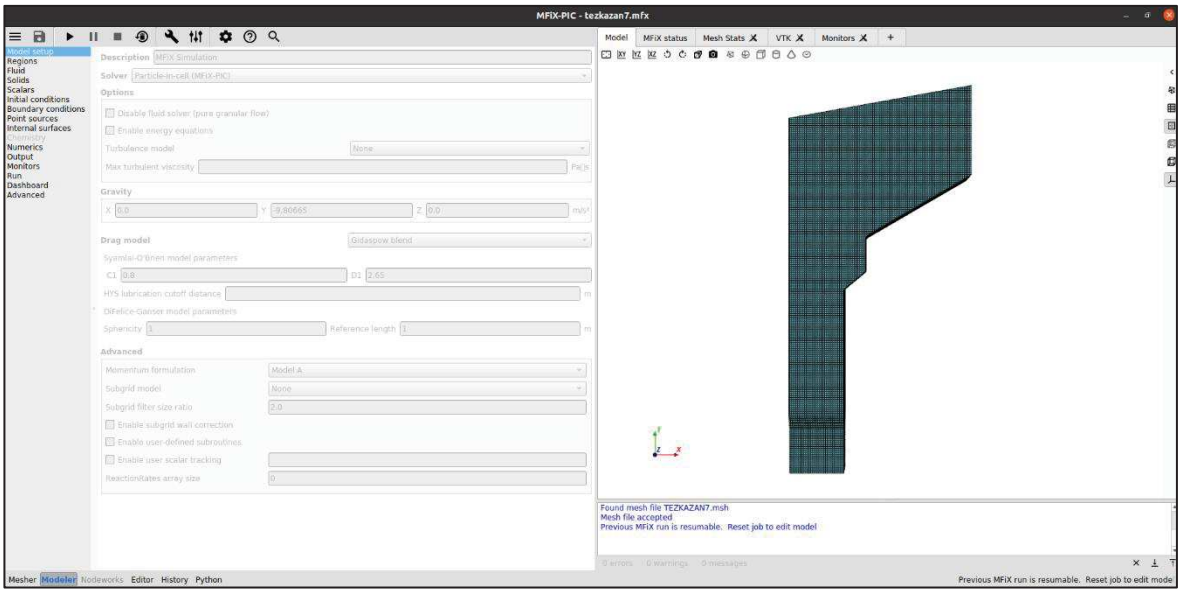
Stokiyometrik yanma kuralları ve yakıt elementer analizi dikkate alınarak bölüm 3.2'de verilen eşitlikler kullanılarak yanma sonucu ortaya çıkacak baca gazlarının analitik hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yanma sonucu ortaya çıkan baca gazlarının analitik hesaplamaları

| **Parametre** | **Değer** |
|---|---|
| Teorik yanmada oksijen gereksinimi ($O_{2min}$) | 0,8197701 $Nm^3/kg$-Y |
| Teorik yanmada hava gereksinimi ($V_{Hth}$) | 3,903667143 $Nm^3/kg$-Y |
| Gerçek yanmada hava gereksinimi ($V_H$) | 5,465134 $Nm^3/kg$-Y |
| Hava fazlalık katsayısı (n) | 1,4 |
| Teorik yanmada kuru yanma gazı miktarları | |
| $V_{Gkrth}$ | 3,881867143 $Nm^3/kg$-Y |
| $V_{CO2}$ | 0,7927701 $Nm^3/kg$-Y |
| $V_{SO2}$ | 0 |
| $V_{NY}$ | 0,0052 $Nm^3/kg$-Y |
| $V_{NH}$ | 3,083897043 $Nm^3/kg$-Y |
| Teorik yanma gazı nem miktarı ($V_{H2O}$) | 0,760207277 $Nm^3/kg$-Y |
| Teorik yanmada yaş yanma gazı miktarı ($V_{gyth}$) | 4,642074419 $Nm^3/kg$-Y |
| Gerçek yanmada yaş yanma gazı miktarı ($V_{gy}$) | 6,223840346 $Nm^3/kg$-Y |
| Gerçek yanmada kuru yanma gazı miktarı ($V_{gkr}$) | 5,463633069 $Nm^3/kg$-Y |
| Toplam yakma havası miktarı ($V_{H0}$) | 16,54972463 $Nm^3/s$ |
| Toplam yanma gazı miktarı ($V_{G0}$) | 18,84726776 $Nm^3/s$ |
| T (°C) sıcaklığında yakma havası miktarı ($V_H$) | $V_H = V_{H_0} * \frac{T_H + 273}{273}$ |
| T (°C) sıcaklığında yanma gazı miktarı ($V_G$) | $V_G = V_{G_0} * \frac{T_G + 273}{273}$ |

## 4.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Soğuk Model Analizi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile akışkan yataklı kazan geometrisi ve çalışma şartları dikkate alınarak sistem modellenmiştir. Yürütülen çalışmada gaz fazını Euler, katı fazını Lagrange yaklaşımı ile modellemeye imkan tanıyan PIC modeli kullanılmıştır. İlgili modelin matematiksel çözümünü gerçekleştirmek için NETL (A.B.D) laboratuvarının geliştirmiş olduğu, MFiX açık kaynak kodlu paket programı kullanılmıştır. Şekil 4.3'te MFiX paket programının örnek bir ekran görüntüsü verilmiştir. Program, arayüz desteği ile de kullanılmaktadır. Açık kaynak kodlu olmasının avantajı ile gerektiği durumlarda arayüz kullanılmadan Python programlama dili ile kullanılabilmekte, Fortran tabanlı çözücü için yazılımda istenilen değişiklikler yapılabilmektedir.




Şekil 4.3. MFiX paket programı ana menü örnek ekran görüntüsü

Programın görsel arayüzü, ağ oluşturma (mesher) ve model oluşturma (modeler) için iki sekme içermektedir. Düzenleyici (editor) sekmesi ile yazılım kodlarına doğrudan erişim sağlanabilmekte ve değişiklikler yapılabilmekte; tarih (history) sekmesi ile kod üzerinde daha önce yapılmış değişikliklere versiyon ve tarih bilgileri ile birlikte ulaşılabilmektedir. Modelleme süreci basamaklar halinde aşağıda verilmiştir:

1. Ağ oluşturucu (mesher) sekmesinde geometri (bir CAD programı ile oluşturulmuş .stl uzantılı dosya), başlangıç şartları, sınır şartları gibi bölgelerin belirlenmesi yapılmıştır.
2. .stl uzantılı dosyanın doğru tanımlanabilmesi için gereken parametreler ayarlandıktan sonra ağ yapısını oluşturacak hücrelerin sayısı üç eksen için de belirlenmiştir.
3. İstenilen ağ yapısı oluşturulduktan sonra model oluşturucu (modeler) sekmesine geçilerek model kurma (model setup) bölümünden modelin genel özellikleri (çözücü tipi, türbülans modeli, yerçekimi, sürükleme modeli vb.) tanımlanmıştır.
4. Fluid bölümünde, akışkanın modele uygun özkütle ve viskozite değerleri tanımlanmıştır.
5. Solids bölümünde, katı fazın çap, özkütle, istatiksel ağırlık gibi değerleri belirlenmiş; aynı bölümde bulunan PIC sekmesinde ise PIC model parametreleri tanımlanmıştır. Partikül boyut dağılımı (PSD) belirleme işlemi de bu adımda gerçekleştirilmiştir.

6. Başlangıç şartları (initial conditions), sınır şartları (boundary conditions), nokta kaynaklar (point sources) ve iç duvarlar (internal surfaces) bölümlerinde sırasıyla:

- Simülasyon başlangıç anındaki gaz fazı ve katı fazının özellikleri,
- Birincil ve ikincil hava besleme giriş şartları, varsa katı faz besleme debileri, duvar şartları ve çıkış şartları,
- Ağ yapısının çözmek için yeterince küçük olmadığı nozullar gibi kaynakların özellikleri,
- Ağ yapısının çözmek için yeterince küçük olmadığı çok ince duvarlar, plakalar gibi yüzeylerin özellikleri (örn. geçirimli olup olmaması),

belirlenmiştir.

7. Sayısal değerler (numerics) bölümünde maksimum iterasyon sayısı, yakınsama limitleri, ayrıklaştırma şemaları (Superbee, Smart, van Leer vb.), çözücü matematiksel limitleri gibi sayısal analiz parametrelerini içeren özellikler belirlenmiştir.
8. Çıktı (output) ve monitörler (monitors) bölümlerinde çözüm sonrasında elde edilmesi beklenen gaz fazı ve katı fazı için boşluk kesri, basınç, sıcaklık, hız gibi değerlerin tanımlaması yapılmıştır.
9. Koşma (run) bölümünde toplam simülasyon süresi, minimum ve maksimum zaman adımları, zaman adım faktörü değişkenleri tanımlanmıştır.
10. DMP ile işlemcide çoklu çekirdek ile paralel çözüm yaptırıldığından, en üstte bulunan anahtar sekmesi (build solver) kullanılarak mpifort derleyicisi ile çözücü tekrar derlenmiştir.

Endüstriyel ölçekli buhar kazanlarında, laboratuvar ölçekli akışkan yatakların aksine soğuk model hidrodinamik analiz yapmak, tüm sistemi üretim dışında çalıştırmayı gerektirdiğinden yüksek maliyetlere yol açmaktadır. Ayrıca yanma esnasında ölçümler yapmak laboratuvar şartları kadar kolay olmamaktadır. Enerji ve kimyasal çözümü dahil etmeden önce oluşturulan matematik modelin kararlı olduğunu doğrulamak için Adamczyk vd.'nin [50] yaptıkları çalışmada olduğu gibi psüdo-yanma şartları ile analiz yapmak ekonomik olarak daha kolay olmaktadır. Psüdo-yanma koşulları, analitik ve/veya deneysel verilerden alınmış gaz debisi ve konsantrasyonlarının sınır şartları olarak tanımlanması ile oluşturulmaktadır.

Tez çalışması kapsamında soğuk model olarak adlandırılan gaz-katı iki fazlı hidrodinamik çözüm, dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanının çalışma koşullarındaki şartların sınır şartları olarak tanımlandığı, enerji ve kimyasal denklemlerin dahil edilmediği psüdo-yanma şartlarını kapsamaktadır.

Soğuk model analizi kapsamında, MFiX-PIC ile çözümü yapılan momentum korunum ve süreklilik denklemleri aşağıda verilmiştir [14,40,41,45,51]:

Süreklilik denklemleri

Gaz fazı (g) için süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{u}_g) = 0 \tag{4.3}$$

Momentum korunum denklemleri

Gaz fazı (g) için momentum korunumu:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \vec{u}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{u}_g \vec{u}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \nabla . \bar{\bar{\tau}}_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} - \sum_{p=1}^{n_T} W_p \frac{V_p}{V_c} \beta_p (\vec{U}_g(\vec{x}_p) - \vec{U}_p) \tag{4.4}$$

Burada $W_p$ istatistiksel ağırlık, $V_c$ ve $V_p$ akış hücresi ve partikül hacimleridir. $\beta_p$ sürükleme kuvveti katsayısı, $(\vec{U}_g(\vec{x}_p)$ ise parsel konumundaki gaz hızıdır. $\bar{\bar{\tau}}_g$ ise gaz fazı stres tensörüdür:

$$\bar{\bar{\tau}}_g = 2\mu_g \bar{\bar{S}}_g, \quad \bar{\bar{S}}_g = \frac{1}{2}\left[\nabla \vec{u}_g + (\nabla \vec{u}_g)^T\right] - \frac{1}{3} \cdot \nabla \vec{u}_g \bar{\bar{I}} \tag{4.5}$$

Parsel hareket denklemleri:

$$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{U}_p \tag{4.6}$$

$$\frac{d\vec{U}_p}{dt} = -\frac{\nabla p}{\rho_s} - \frac{\nabla p_s}{\varepsilon_s \rho_s} + \vec{g} + \frac{\beta_p}{\rho_s}(\vec{U}_g(\vec{x}_p) - \vec{U}_p) \tag{4.7}$$

Burada $p_s$ partikül(katı faz) basıncı:

$$p_s = \frac{P_s^* \varepsilon_s^\alpha}{\varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_s} \tag{4.8}$$

Burada $P_s^*$, α PIC modeli ile ilgili parametreler ve $\varepsilon_{s,\max}$ sıkı istif durumundaki katı hacim kesridir.

Gaz katı sürükleme modeli

Sürükleme modeli, gaz katı akışların analizinde en önemli parametrelerden biridir. PIC modeli, partiküllerin küresel olduğu kabulüne dayandığından sürükleme modeli seçiminde bu kabule dikkat edilmelidir [40]. Literatürde akışkan yatak çözümleri için en çok kullanılan sürükleme modelleri Syamlal-O'Brien, Gidaspow, Wen-Yu ve Wen-Yu/Ergun sürükleme modelleridir.

Gaz-katı momentum transferi için momentum korunum denklemindeki etkileşim kuvveti, $I_{gm}$, Eş. 4.9'da verilmiştir.

$$I_{gm} = \beta_p(\vec{U}_s - \vec{U}_g) \tag{4.9}$$

Gaz-katı sürükleme modelleri, temel olarak sürükleme katsayısı $\beta_p$'nin belirlenmesini hedeflenmektedir. Tez çalışması kapsamında literatürde Wen-Yu/Ergun denklemi olarak da anılan Gidaspow karışım modeli kullanılmıştır.

Gidaspow karışım (Wen-Yu/Ergun) modeli

Wen-Yu ve Ergun denklemleri sırasıyla seyrek ve sıkı fazları tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu da bölgesel boşluk kesrinin sırasıyla 0,8'den büyük/eşit ve 0,8'den küçük olduğu anlamına gelmektedir. Gidaspow, bölgesel boşluk kesrine bağlı olarak iki modelin birleşimi bir model önermiştir. Modeller arasında oluşabilecek süreksizliğin önüne geçmek için Eş. 4.10 ile belirtilen bir karışım fonksiyonu önermiştir.

$$\varphi_{gs} = \frac{\arctan\left[150x1.75(0.2-\varepsilon_s)\right]}{\pi} + 0.5 \tag{4.10}$$

Gidaspow karışım sürükleme modeli için sürükleme katsayısı Eş. 4.11 ile MFiX yazılımına uygulanmıştır.

$$\beta_p = (1-\varphi_{gs})\beta_{p(Ergun)} + \varphi_{gs}\beta_{p(Wen-Yu)} \tag{4.11}$$

Sonuç olarak, Gidaspow karışım (Wen-Yu/Ergun) sürükleme modeli Eş. 4.12 ile verilmiştir.

$$\beta = \begin{cases} \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g \left|\vec{u}_g - \vec{u}_p\right|}{d_p} \varepsilon_g^{-2,65} & \varepsilon_g \geq 0,8 \\ \frac{150\varepsilon_s(1-\varepsilon_g)\mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + \frac{1,75\rho_g \varepsilon_s \left|\vec{u}_g - \vec{u}_p\right|}{d_p} & \varepsilon_g \leq 0,8 \end{cases}$$

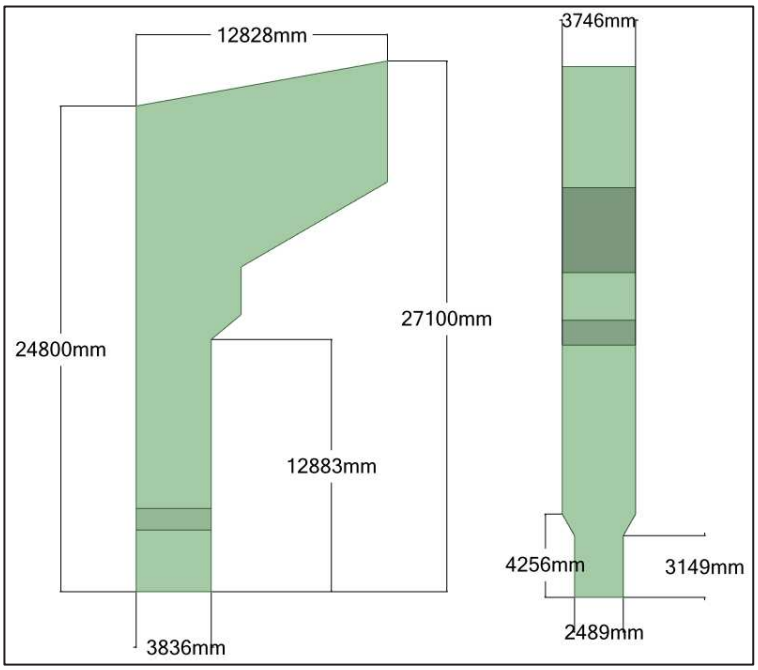
$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\mathrm{Re}(1+0,15\,\mathrm{Re}^{0,687})} & \mathrm{Re} < 1000 \\ 0,44 & \mathrm{Re} \geq 1000 \end{cases} \tag{4.12}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\varepsilon_g \rho_g \left|\vec{u}_g - \vec{u}_p\right| d_p}{\mu_g}$$

### 4.2.1. Modelin oluşturulması

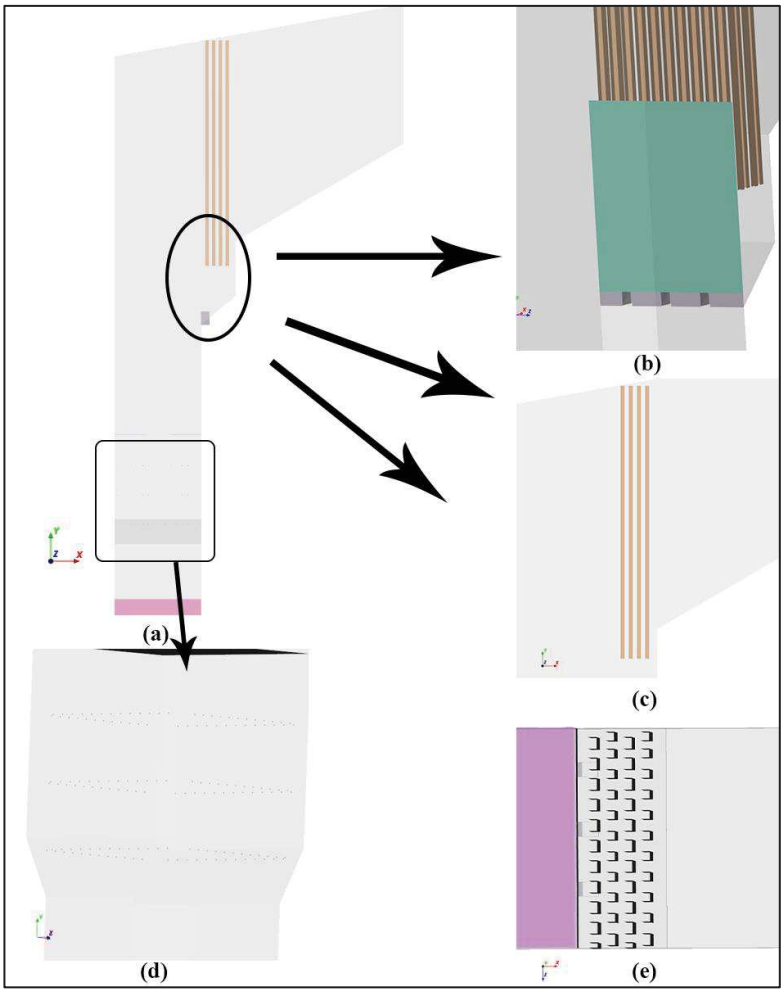
Şekil 4.4'te ön ve yan iki boyutlu geometrisi verilmiş olan buhar kazanının üç boyutlu modeli oluşturularak .stl uzantılı olarak kaydedilmiş ve MFiX yazılımına tanıtılmıştır.

Geometrisi verilen akışkan yatağın yatay eksendeki ölçüleri alt bölgede 3836 mm x 2486 mm iken genişletilerek 3836 mm x 3746 mm olarak oluşturulmuştur. Stl uzantılı geometri, Kartezyen hücre (cut-cell) metodu ile duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır.




Şekil 4.4. Biyokütle yakıtlı dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı ön ve yan görünüş CAD geometrisi

Tasarımda ana yatak bölgesini kızdırıcı, ekonomizör gibi ısı transfer yüzeylerinden ayıran ve dolaşımı sağlamakta yardımcı ara duvar (3,746 m x 4,645 m) bulunmaktadır. Ayrıca yatay yönde ilerleyen katı partiküllerin kazandan tamamen ayrılmasını engellemek için 4 sıra u-kiriş yerleştirilmiştir. İkincil hava beslemesi için 3 farklı yükseklikte (4,03 m, 5,33 m, 6,63 m) ve köşelerden 0,5 m, birbirinden 0,25 m uzaklıkta olacak şekilde her yüzeye nozullar yerleştirilmiştir. Her bir nokta, yazılımda nokta kaynak olarak belirtilmiş ve debi, açı gibi özellikler tanımlanmıştır. Şekil 4.5, sınır şartları için gereken iç duvar şartlarını göstermektedir.




Şekil 4.5. Sınır şartları için iç yüzey ve nokta kaynak olarak belirlenmiş bölgelerin gösterimi (a) akışkan yatak genel görünüş (b) dolaşımı sağlayan iç duvar (c) u-kirişler (d) ikincil hava nozulları (e) u-kiriş yerleşimi

Akışkan yatak içindeki hava nozulları ve su duvarlarının yerleşimi Resim 4.2'de verilmiştir. İlgili resimde sol tarafta ikincil hava nozulları, sağ tarafta ise bakım için durdurulması esnasında yatak altındaki birincil hava nozulları gösterilmiştir. İkincil hava nozullarının bulunduğu yüksekliğe kadar izolasyon malzemesi bulunmakta, daha sonrasında ise buharlaştırıcı su duvarları bulunmaktadır.



Resim 4.2. Akışkan yatak içi fotoğrafı ikincil hava nozulları (solda), yatak altı birincil hava nozulları (sağda)

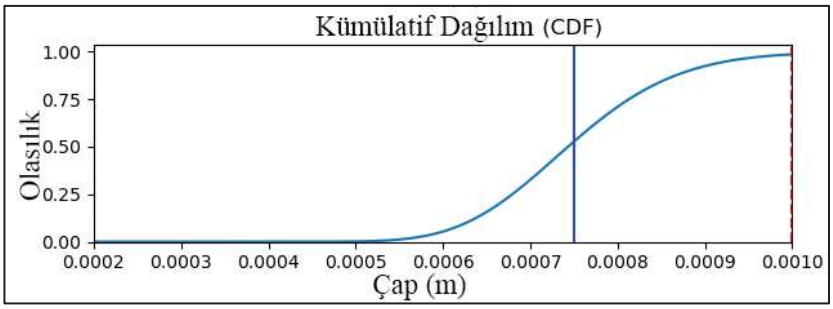
Şekil 4.5(a)'da en alt bölgede görülen pembe bölge katı malzeme başlangıç şartı olarak belirlenmiştir. 0,7 m yükseklikte, yatağın tabanını kaplayacak şekilde özellikleri belirlenmiş katı partikül bu bölgede olacaktır. Ana havanın yatağın altından eşit şekilde beslendiği ve sağ taraftan çıkış yaptığı tanımlanmıştır.

HAD çözümü için gerekli bazı parametreler ve PIC modeli için gerekli katı parametreleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelge 4.5'te ise çözümü yapılacak modelin başlangıç ve sınır şartları verilmiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi soğuk model (enerji denklemleri kullanılmadan) oluşturulurken Adamczyk ve arkadaşlarının kullanmış olduğu psüdo-yanma koşulları sınır şartları olarak tanımlanmıştır [50].

Katı malzeme partikül çapının belirlenmesi

Yatak malzemesi tanımlanırken log-normal tip partikül boyut dağılımı (PSD) yöntemi kullanılmıştır. En düşük çap 200 μm, en büyük çap 1000 μm ve standart sapma 100 μm olacak şekilde kum partiküllerin boyut dağılımları Şekil 4.6'daki gibi belirlenmiştir.




Şekil 4.6. Yatak malzemesi (kum) partikül çap dağılımı

Çizelge 4.4. Sayısal çözümü yapılacak modelin gaz fazı ve PIC parametreleri

| **Parametre** | **Değer** |
|---|---|
| Gaz-Katı Sürükleme Modeli | Gidaspow Karışım (Wen-Yu/Ergun) |
| Çözüm Hacmi Hücre Sayısı | 507600, 660000, 804540, 1083240, 1415700 |
| Gaz Fazı (Yanma Gazı) | |
| Viskozite, $\mu$ (Pa.s) | $4{,}3450 * 10^{-5}$ |
| Yoğunluk, $\rho_g$ (kg/m$^3$) | 0,3443 |
| Katı Fazı (Kum) | |
| Ortalama Partikül Çapı, $d_p$ ($\mu$m) | 750 |
| Partikül Yoğunluğu, $\rho_s$ (kg/m$^3$) | 2400 |
| İstatistiksel Ağırlık (partikül/parsel), $W_p$ | 10000, 25000, 50000, 75000, 100000 |
| PIC Parametreleri | |
| Sıkı İstif Katı Boşluk Kesri, $\varepsilon_{cp}$ | 0,55 |
| Boşluk Kesri Üstel Ölçek Faktörü | 3,0 |
| Ampirik Sönümleme Faktörü | 0,85 |
| Tekil Olmama Sabiti | $1{,}0*10^{-7}$ |
| Partikül-Duvar geri sıçrama (restitüsyon) teğet katsayısı, $e_\tau$ | 0,99 |
| Partikül-Duvar Geri Sıçrama (restitüsyon) normal katsayısı, $e_w$ | 0,3 |
| CFL Kontrol Değeri (Maksimum) | 0,5 |

Çizelge 4.5. Sayısal çözümü yapılacak modelin başlangıç ve sınır şartları

| **Parametre** | **Değer** |
|---|---|
| Başlangıç Şartları | |
| Kum Yatağı Yüksekliği (m) | 0,7 |
| Çalışma Sıcaklığı, $T_{op}$ (K) | 1123,0 |
| Yataktaki Katı Oranı | 0,55 |
| Sınır Şartları | |
| Birincil Hava Giriş Şartı | |
| Gaz Hacim Kesri | 1,0 |
| Kütlesel Gaz Debisi (kg/s) | 18,18635 |
| Basınç (kPa) | 101,325 |
| Atmosfer Çıkış Şartı | |
| Basınç (kPa) | 100,825 |
| Duvar Sınır Şartları | |
| Dış Duvarlar | Kayma-olmayan |
| İç Yüzeyler | Kayma-serbest |
| Noktasal Kaynaklar İçin Giriş Şartları | |
| Kütlesel Gaz Debisi (Her Bir Nozul İçin) (kg/s) | 0,056713 |
| Nozul Açıları | Her nozulun bulunduğu düzlem normaline 20° açı ile sağ tarafa doğru |

Bölüm 3.3.2'de boyutsal ayrıklaşma şemalarından bahsedilmiştir. Literatürde MFiX yazılımı ile yapılan çözümlerde çoğunlukla Superbee şemasının kullanıldığı görülmüştür [51,52,53,54,55]. Clarke, MFiX kodunda kullanılan ayrıklaştırma şemalarının çözüme, çözüm süresine vb. olan etkilerini ve hesaplama sürelerini düşürme ile ilgili bir tez çalışması yürütmüştür [56]. Yüksek derece ayrıklaştırma şemaları, genelde daha yavaş yakınsama gösterirken, daha düşük hatalarla çözüme yaklaşmaktadırlar. Ancak Van Leer şeması kullanıldığında, Superbee gibi daha düşük derece ayrıklaştırma şemalarına kıyasla daha hızlı yakınsama gerçekleştiği görülmüştür [12].

Çizelge 4.6'da literatürden alınan bilgiler ve Wang ve arkadaşlarının çalışmalarını [12] göz önüne alarak tanımlanmış boyutsal ayrıklaştırma şemaları verilmiştir. Gevşeme (relaksasyon) faktörleri olarak yazılımın varsayılan olarak sunduğu değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.6. Sayısal çözümde her bir parametre için uygulanacak boyutsal ayrıklaştırma şemaları ve gevşeme faktörleri

| **Parametre** | **Değer** | **Gevşeme (Relaksasyon) Faktörü** |
|---|---|---|
| Gaz Basıncı | van Leer | 0,8 |
| Hacim Kesri | Superbee | 0,5 |
| U-momentum | van Leer | 0,5 |
| V-momentum | van Leer | 0,5 |
| W-momentum | Superbee | 0,5 |
| Enerji | Superbee | 1,0 |
| Kütle Kesri | van Leer | 1,0 |
| Granüler Enerji | Superbee | 0,5 |
| Scalar ve K-ε | Superbee | 0,8 |
| DES Difüzyonu | Superbee | 1,0 |

Zaman adımının ve Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) sayısının belirlenmesi

MFiX yazılımı, iterasyonlar için gerekli zaman adımını yönetmek için zaman adımı faktörünü ve PIC modeli için belirlenmiş CFL değerini kullanmaktadır. Çalışmada, literatürde hidrodinamik, enerji ve yanma analizleri için kullanılan zaman adımlarına uygun olarak Çizelge 4.7'deki gibi verilen zaman adımı kontrol değerleri kullanılmıştır. Zaman adımı faktörü, iterasyonların yakınsama veya ıraksama durumuna bağlı olarak bir sonraki zaman adımının değerini belirlemektedir.

CFL, zaman adımı kontrolünün otomatik şekilde yapılmasını, istikrarlı ve isabetli sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır [18,57].

Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) koşulu tek boyut için Eş. 4.13'deki gibi olmaktadır [58].

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq CFL_{\max} \tag{4.13}$$

CFL koşulunun n-boyutta genelleştirilmiş hali ise Eş. 4.14'te verilmiştir.

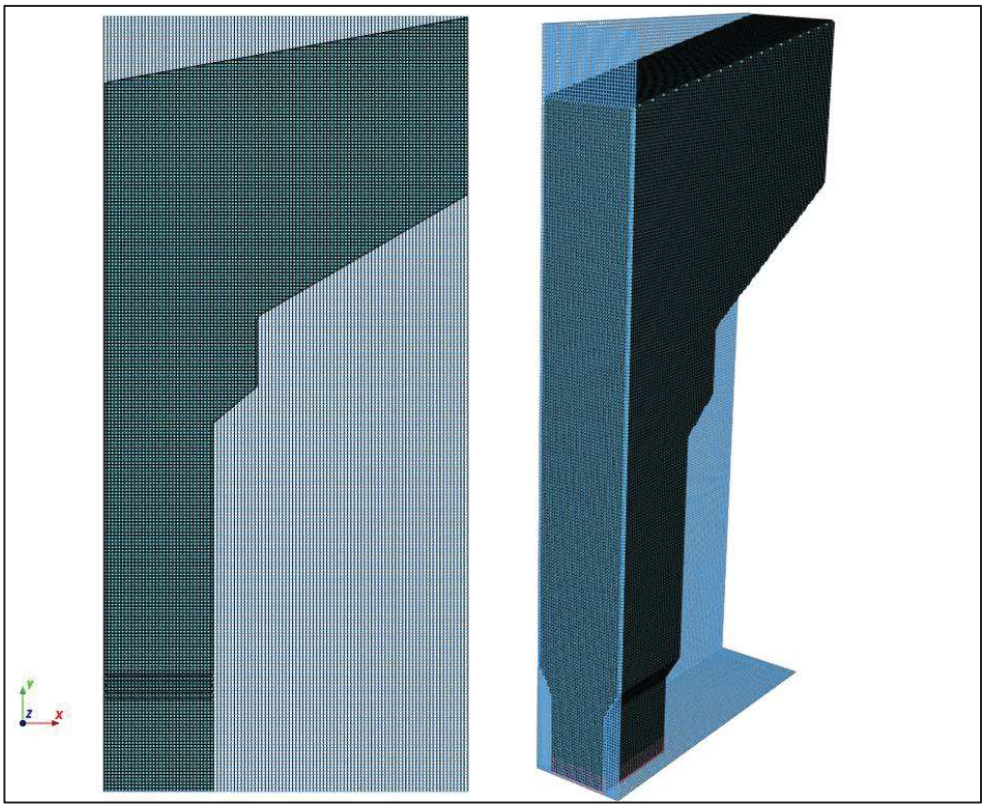
$$CFL = \Delta t \left( \sum_{i=1}^{n} \frac{u_{x_i}}{\Delta x_i} \right) \leq CFL_{\max} \tag{4.14}$$

Çizelge 4.7. Sayısal çözümü yapılacak modelin nümerik ve çözüm kontrol değerleri

| **Parametre** | **Değer** |
|---|---|
| Her bir zaman adımı için Maksimum iterasyon sayısı | 150 |
| Ayrıklaştırılmış denklemler için lineer çözücü | BiCGSTAB [59] |
| Toplam simülasyon süresi (s) | 30 |
| Başlangıç zaman adımı (s) | $5{,}0 * 10^{-4}$ |
| Maksimum zaman adımı (s) | $1{,}0 * 10^{-2}$ |
| Minimum zaman adımı (s) | $1{,}0 * 10^{-7}$ |
| Zaman adımı faktörü | 0,9 |

### 4.2.2. Hücre sayısından bağımsızlık çalışması

Duvar sınır şartları, giriş-çıkış sınır şartları ve başlangıç şartları belirlenen akış alanı üç boyutlu olarak sayısal çözüme uygun kafes hücrelere bölünmüştür. Akış bölgesi, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi çözüm hücrelerine bölünmüş ve kartezyen hücre (cut-cell) metodu ile sınır şartları tanımlanmıştır. Sınır şartları belirlenmeden önceki tüm akış bölgesi 12,718 m x 27,1 m x 3,748 m olarak belirlenmiştir. Kartezyen hücre metodu, duvarlar arasında kalan bölgeyi akış alanı olarak tanımlayarak çözüme etkisi olmayan alanın çıkarılmasını sağlamaktadır.



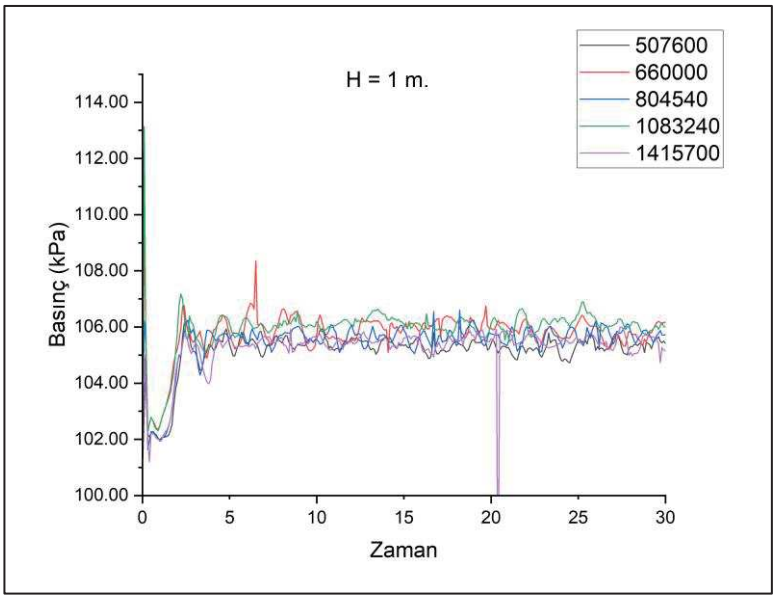
Şekil 4.7. Tüm akış bölgesi için hücrelerin belirlenmesi ve sınır şartlarının oluşturulması

Tez çalışması kapsamında sayısal çözümün hücre sayısından bağımsızlığını doğrulamak için beş farklı hücre sayısı ile çözüm yapılmıştır. Bu çözümler, 507600, 660000, 804540, 1083240 ve 1415700 hücreden oluşmaktadır. İlgili çalışmadaki ve literatürdeki akışkan yatak HAD çalışmalarına ait hücre sayıları ve hacimleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Hücre sayısı artış oranı belirlenirken, literatürde hücre sayısı bağımsızlık çalışmalarında kullanılan 1.3 oranı kullanılmıştır.

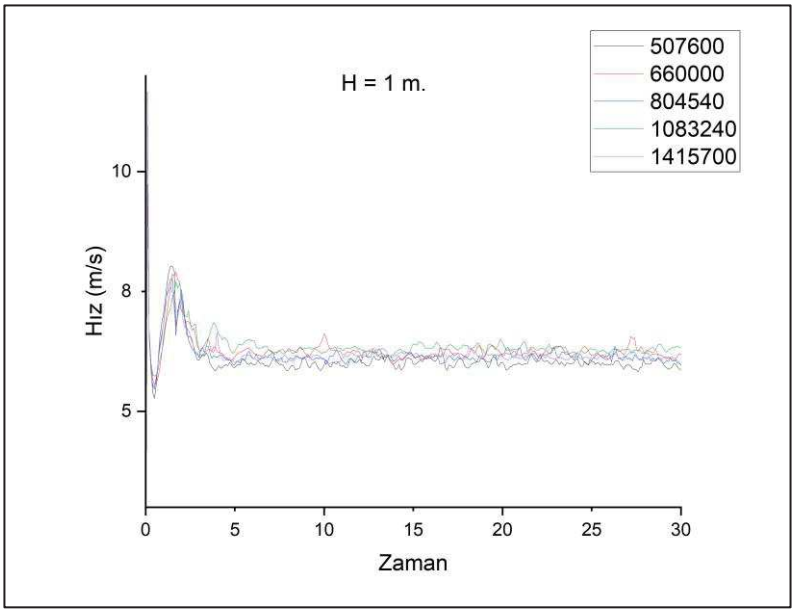
Çizelge 4.8. Akışkan yatak HAD çalışmalarının hücre sayısı ve hacimleri

| **Kaynak** | **Hücre Sayısı** | **Hücre Hacmi ($mm^3$)** |
|---|---|---|
| Mevcut Çalışma | 507600 | $2,55x10^6$ |
| Mevcut Çalışma | 660000 | $1,96x10^6$ |
| Mevcut Çalışma | 804540 | $1,61x10^6$ |
| Mevcut Çalışma | 108324 | $1,19x10^6$ |
| Mevcut Çalışma | 1415700 | $0,91x10^6$ |
| Gu vd.[60] | 82500 | $\sim 2,2x10^6$ |
| Cui vd.[16] | 71454 | $\sim 3,14x10^6$ |
| Yan vd.[61] | 1000000 | $\sim 11,16x10^6$ |

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9, eşit çalışma koşullarında, farklı hücre sayıları ile yapılan çözümlerin H = 1 m yükseklik için zamana bağlı değerlerini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde başlangıçtaki çözüm düzensizliğinin 5. saniyeden itibaren dengeye geldiği görülmektedir. Bu yüzden zaman ortalama değerleri alınırken çözümlerden ilk 5 saniye atılarak hesaplama yapılmıştır.

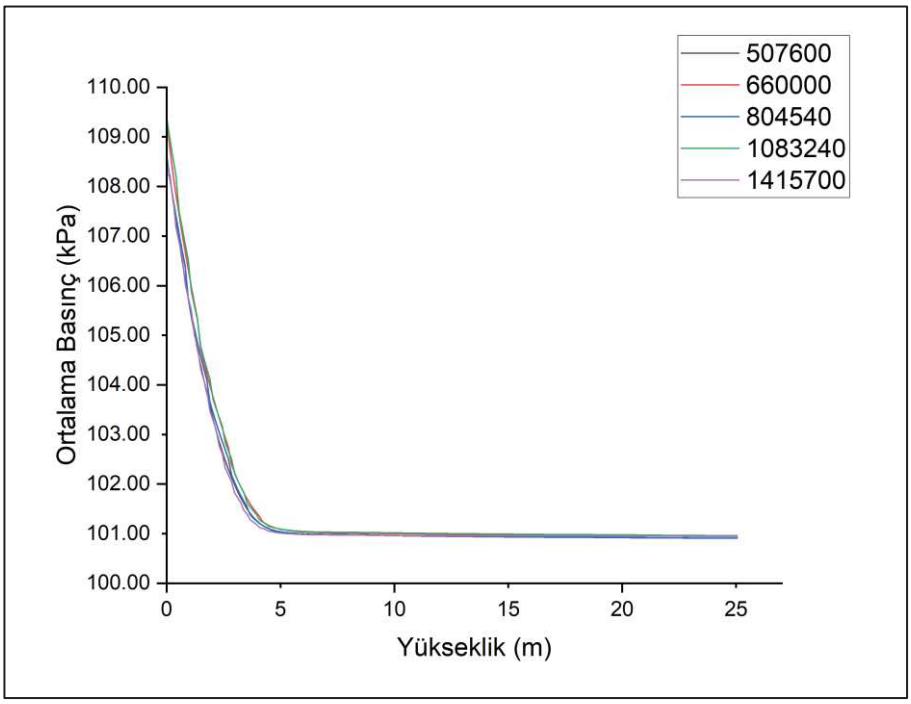



Şekil 4.8. H = 1 m'de her bir hücre sayısı için zamana bağlı ortalama gaz basıncı değerleri



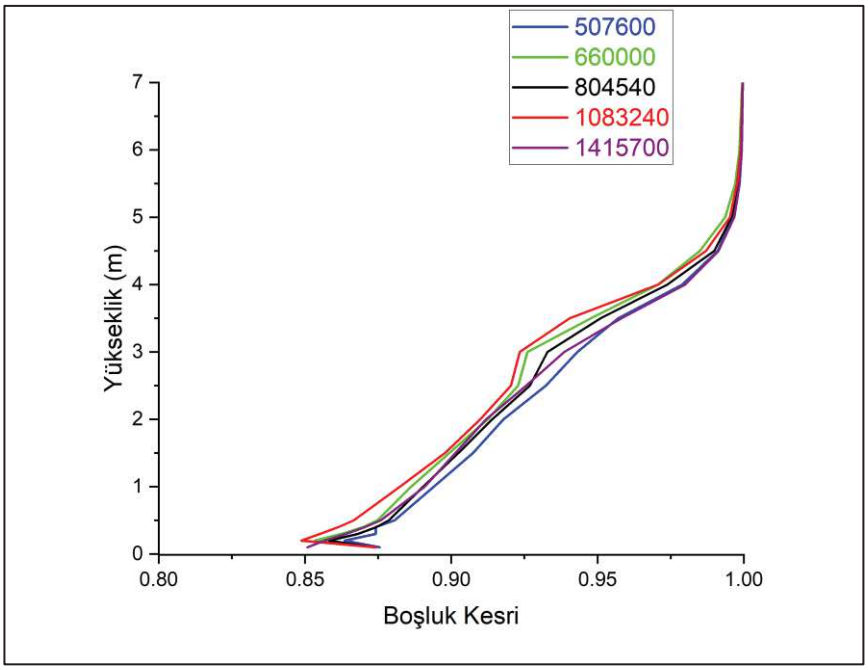

Şekil 4.9. H = 1 m'de her bir hücre sayısı için zamana bağlı ortalama gaz hızı değerleri

Hücre sayısından bağımsızlığı doğrulamak için literatürde, eksenel (veya dikey) basınç profillerini hücre sayıları ile karşılaştırmak sıklıkla kullanılan yöntemlerden biridir. Benzer çalışma mevcut model için de yapılarak Şekil 4.10'da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



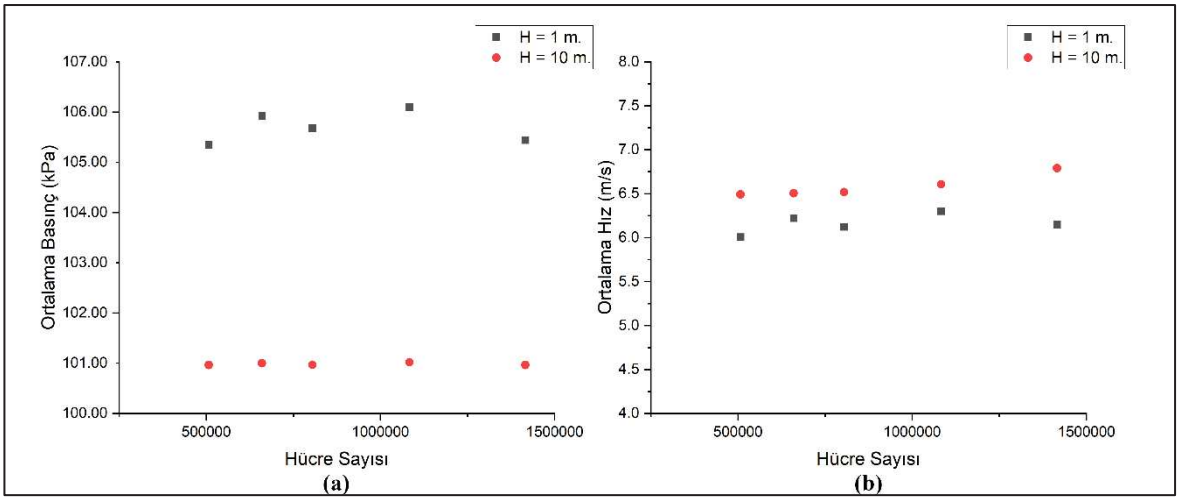

Şekil 4.10. Farklı hücre sayısı yapılarında eksenel basınç profilleri

Farklı hücre sayıları ile yapılan çözümler için zaman ortalamalı, yüksekliğe bağlı boşluk kesri grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir. Sonuçlar akışkan yatağın alt kısmından, üst kısmına doğru yoğun fazdan seyreltik faza geçiş olduğunu göstermektedir. Bu dolaşımlı akışkan yataklar için literatürde anılan "S-şekilli profil" ile uyumludur [57,62]. Yükseklik-boşluk kesri grafiklerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçları gösterdiği gözlemlenmiştir.




Şekil 4.11. Farklı hücre sayısı ile çözümlerde zaman ortalamalı boşluk kesri grafiği

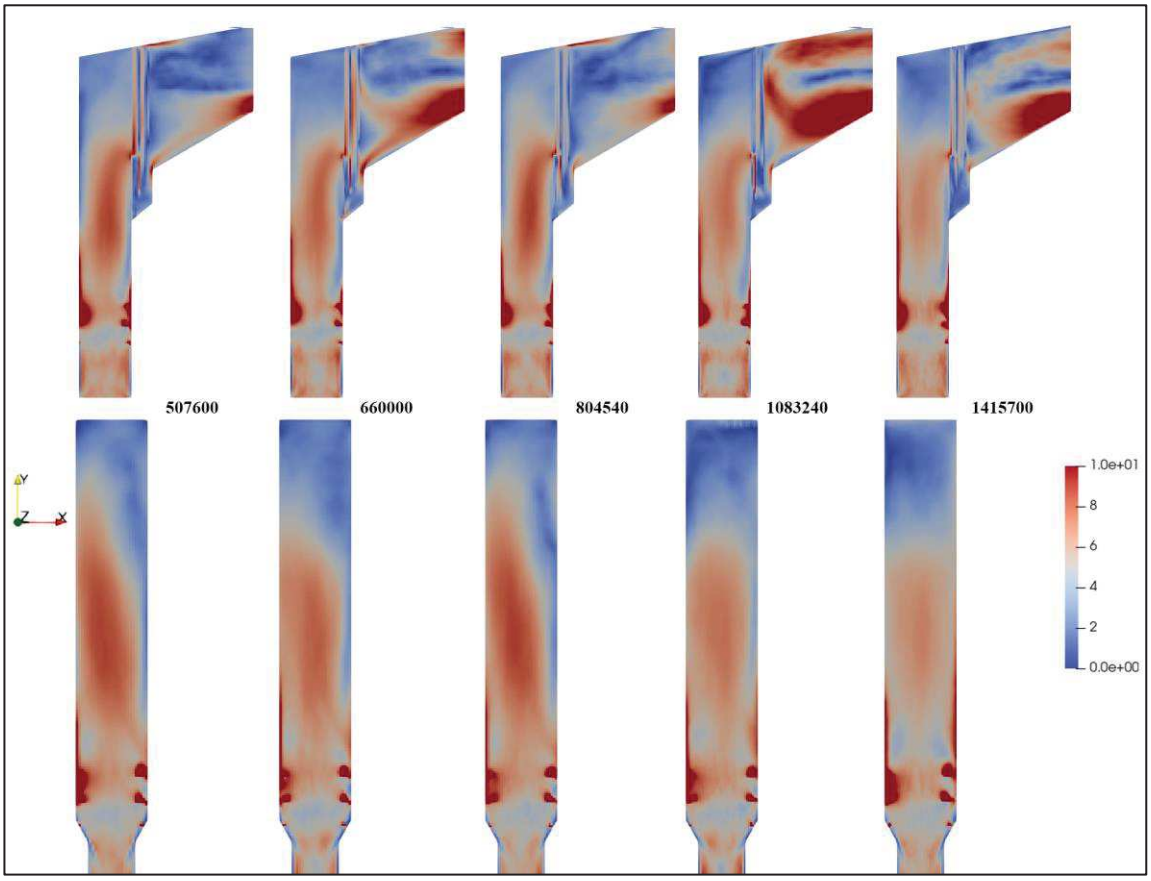
Şekil 4.12 incelendiğinde, ortalama basınç ve hız değerlerinin çözümünün yatağın alt bölgesinde hata payının daha yüksek olduğu, yatağın üst bölgesinde ise daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Aşırı sıkı hücre yapısı PIC metodu için literatürde tercih edilen bir durum değildir.




Şekil 4.12. H = 1 m ve H = 10 m için ortalama (a) gaz basınçları ve (b) gaz hızları

Yatak içindeki gaz hız konturlarının zaman ortalamalı, her bir hücre yapısı için ön ve sol görünüşleri Şekil 4.13'te verilmiştir. Kazanın ana yatak ve dönüş bölgesinde hız ortalamalarının benzer sonuçlar sergilediği gözlenirken, çıkış bölgesindeki hız

hareketlerinin benzer olduğu ancak ortalama değerlerde farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir.




Şekil 4.13. Zaman ortalamalı gaz hız konturlarının yatak simetri eksenlerinden alınmış ön ve sol görünüşleri

Grafikler, hız ve basınç konturları ve zaman adımlarındaki sonuçlar incelendiğinde sonuçların en sıkı hücre yapısında (1415700 hücre) ve en seyrek hücre yapısında (507600 hücre) sapmalar yaşadığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ve hesaplama maliyetleri (bilgisayar işlemci gücü, süre vb.) dikkate alındığında 804540 hücre sayısına sahip ağ yapısı seçilmiştir.

### 4.2.3. İstatistiksel ağırlığın model çözümüne etkisi

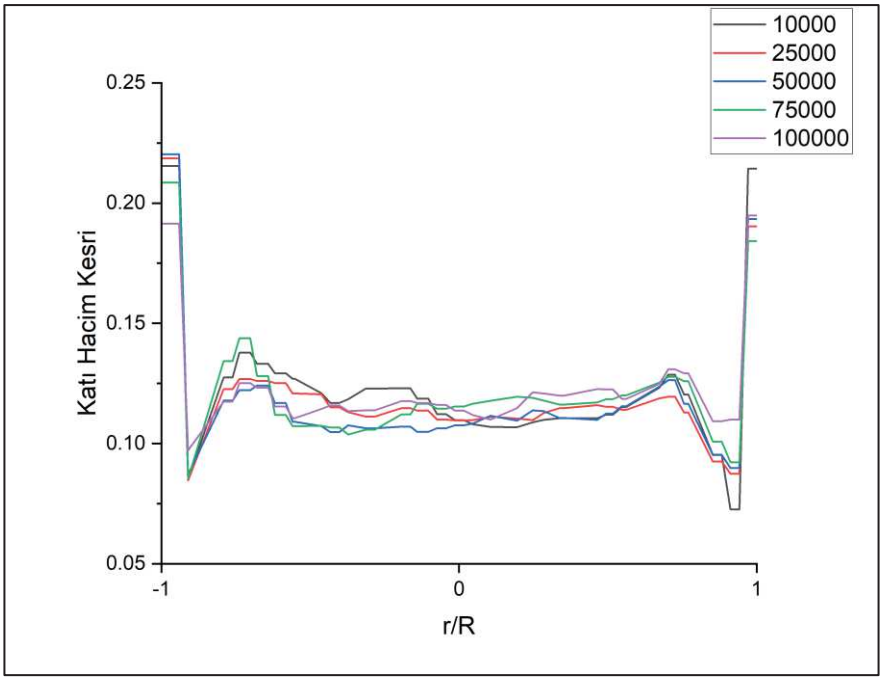
İstatistiksel ağırlık, yani istatistiksel hücre (parsel) başına düşen partikül sayısı; özellikle katı faz sonuçlarına etki eden önemli faktörlerden biridir. Literatürdeki çalışmalarda farklı parsel sayıları ile çözümler yapılmıştır. Hem literatürdeki çalışmaların incelenmesinde hem

de mevcut çalışmada istatistiksel ağırlık seçimi yapılırken Eş (4.15)'dan faydalanarak birim çözüm hücresi başına maksimum parsel sayısı dikkate alınmıştır:

$$\#Parsel_{\max} = \frac{V_{hücre}}{V_{parsel}}$$
$$\#Parsel_{\max} = \frac{V_{hücre}}{W_p * V_{partikül}} \tag{4.15}$$

İstatistiksel ağırlık, $W_p$ için 10000, 25000, 50000, 75000 ve 100000 seçilerek, 804540 hücre sayısında beş farklı çözüm gerçekleştirilmiştir. Her bir istatistiksel ağırlık için yatak içi katı özelliklerindeki değişiklikler incelenerek en uygun istatistiksel ağırlık ($W_p$) seçilmiştir.

Şekil 4.14, 0,5 m yükseklikte x doğrultusundaki istatistiksel ağırlığın katı hacim kesrine etkisini göstermektedir.

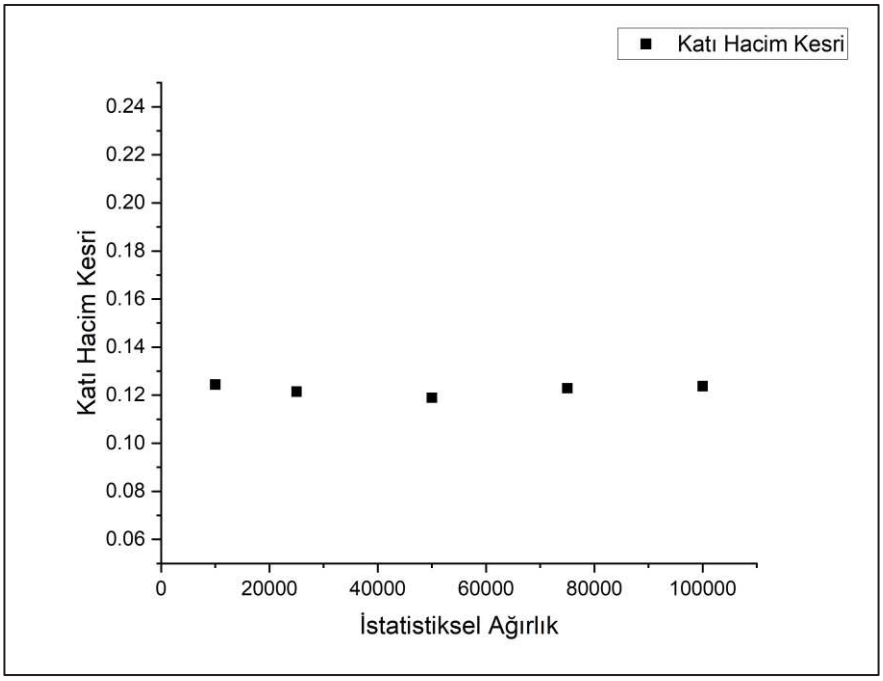



Şekil 4.14. H = 0,5 m yükseklikte istatistiksel ağırlığa bağlı olarak x doğrultusundaki katı hacim kesirleri

Akışkan yataklarda katı dağılımı yatay doğrultuda U şeklinde bir grafik oluşturmaktadır. Hızların duvarlarda düşmesi ve yataktan ayrılan partiküllerin yatağa geri dönüşü duvar bölgesinde daha yüksek olduğu için bu şekilde bir grafik oluşmaktadır. "U şekilli" (veya

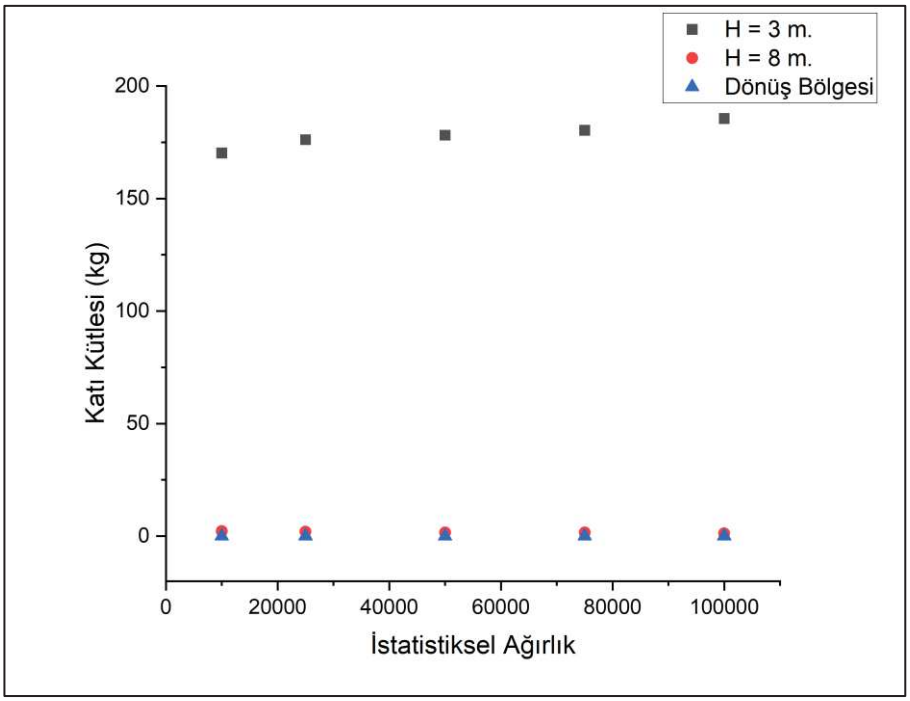
ters U şekli) katı hızı; katı hacim kesri ve boşluk kesri gibi grafiklerde literatürde sıkça kullanılan bir tabirdir[14].

Şekil 4.15, H = 0,5 m yüksekliğindeki birim alandaki zaman ortalamalı katı hacim kesrini göstermektedir. İstatiksel ağırlığın değişime bir miktar etkisi olsa da sonuçların büyük oranda birbirine yakın olduğu görülmüştür.




Şekil 4.15. H = 0,5 m yükseklikte istatistiksel ağırlığa bağlı olarak ortalama katı hacim kesirleri

Şekil 4.16'da H = 3 m, 8 m ve dönüş bölgesi olarak adlandırılan duvar bölgesinden U-kiriş bölgesine geçişteki birim alanların zaman ortalamalı katı kütle miktarları gösterilmiştir. İstatistiksel ağırlıkların katı kütlesine olan etkisinin birbirini yakın olduğu gözlemlenmiştir. Hücre içinde partikül (PIC) modelinde katı miktarı ya da katı akısına hücre sayısının etkisi daha büyükken, istatistiksel ağırlığın etkisi uygun aralıklarda olduğu sürece daha düşüktür [14].

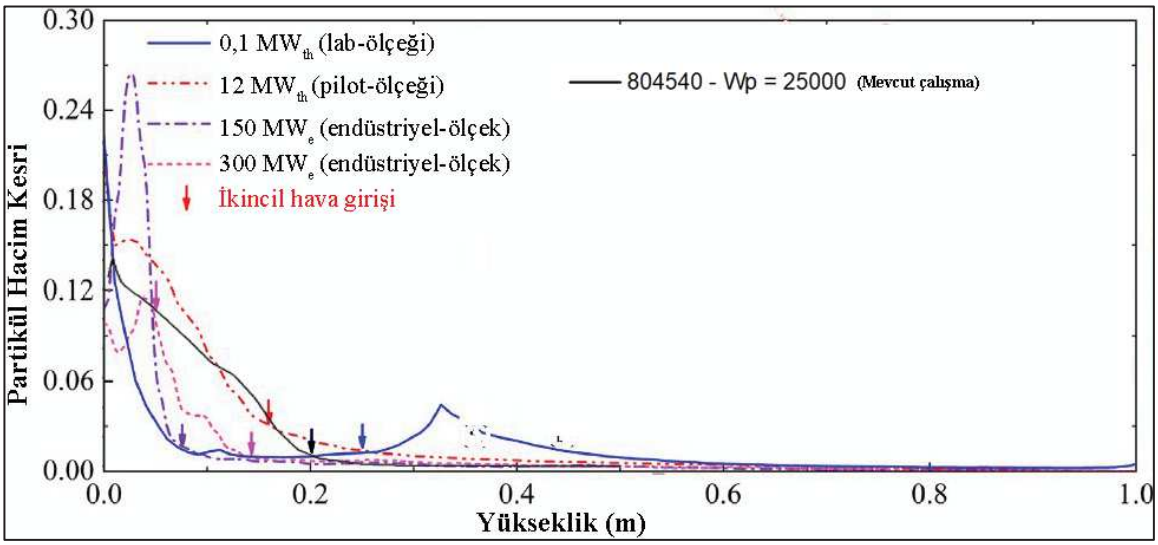



Şekil 4.16. Farklı yüksekliklerde ve dönüş bölgesindeki istatistiksel ağırlığa bağlı ortalama katı kütleleri

Şekil 4.14 - Şekil 4.16'daki grafikler incelendiğinde 100000 (en yüksek) ve 10000 (en düşük) istatistiksel ağırlık değerlerinin diğer değerlerden daha büyük sapmalara sebep olduğu görülmüştür. Diğer üç istatistiksel ağırlık değerleri (25000, 50000, 75000) arasında benzerlikler gözlemlenmiş ve üç değerin de kullanılabileceği kabul edilmiştir. Çözüm süresinde çok büyük maliyete sebep olmadığından, küçük istatistiksel ağırlığın daha ayrıntılı çözüm sunacağı kabulünden yola çıkılarak 25000 değeri çalışmanın devamında kullanılacak değer olarak seçilmiştir.

Literatürde farklı geometri ve yapılarda akışkan yataklı buhar kazanları bulunmaktadır. Orta ve büyük ölçekli akışkan yatak modelleme çalışmalarının büyük çoğunluğu harici siklon bulunduran çalışmalardır. Bu sebeple mevcut model ile karşılaştırılacak en uygun örnek, literatürden bulunmaya çalışılmıştır. Gu vd., DAY kazan ölçeklendirme çalışması için HAD çalışması yapmışlardır [57]. Şekil 4.17, yüksekliğe bağlı partikül hacim kesri bakımından Gu vd.'nin yaptıkları çalışmaların sonucu ile mevcut çalışmanın karşılaştırılmasını içermektedir. İlgili şekilde yükseklik ekseni, farklı geometrilerdeki kazanların; en alt noktasının sıfır, en yüksek noktasının bir olduğu oransal bir yaklaşımla çizilmiştir. Yüksekliğe bağlı partikül kesri grafiklerinde, yükseklik arttıkça partikül oranının (partikül hacim kesri) hızlıca düştüğü gözlemlenmektedir. Mevcut çalışmada katı

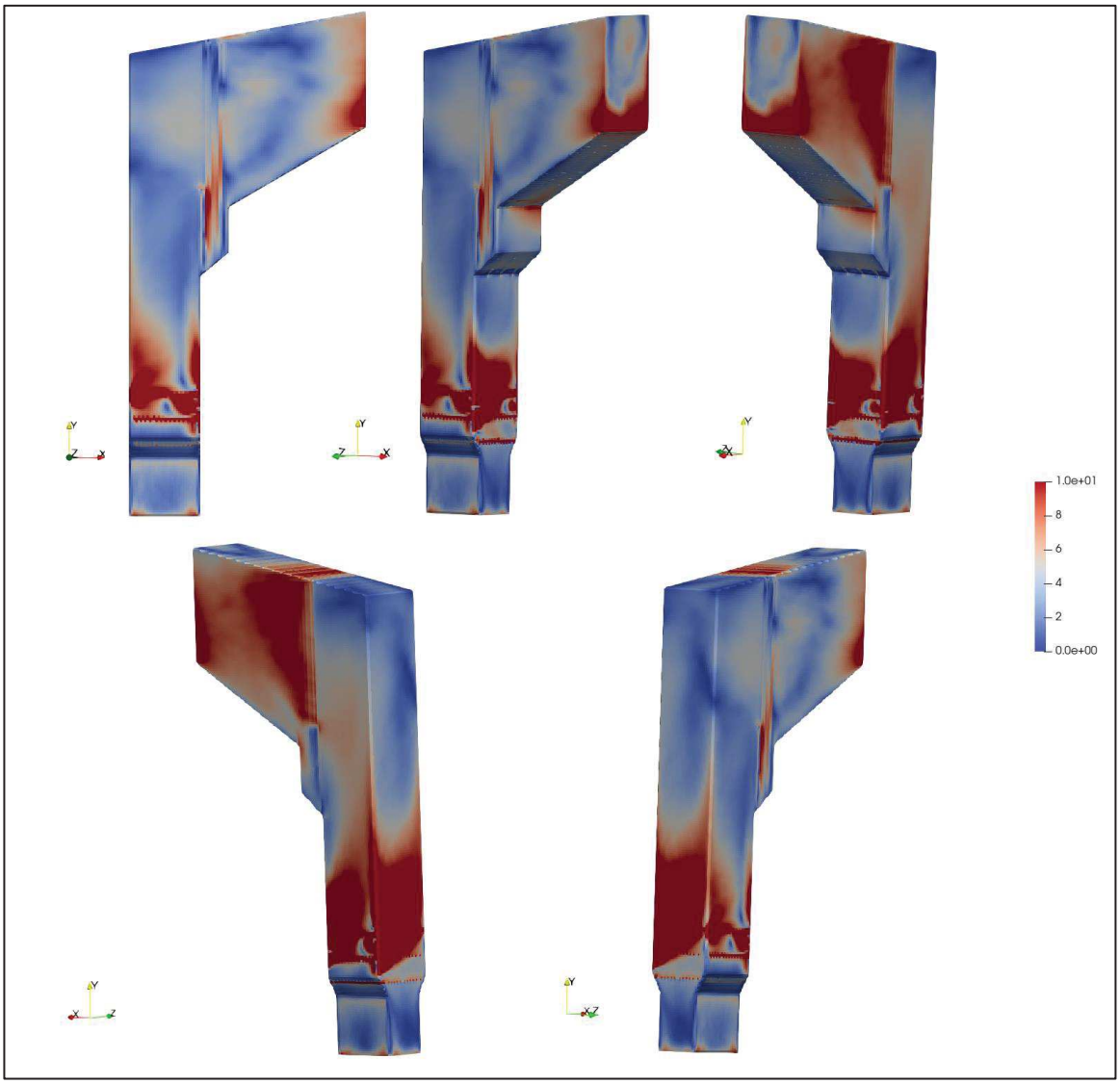
dolaşımının yatak içinde olması sebebiyle bu düşüşün daha yavaş oluştuğu gözlemlenmiştir. Çoğu DAY buhar kazanında ikincil hava besleme noktalarından itibaren yataktaki partikül oranı düşmektedir.




Şekil 4.17. Mevcut çalışma ve Gu vd.[57] yükseklik-partikül hacim kesri karşılaştırması

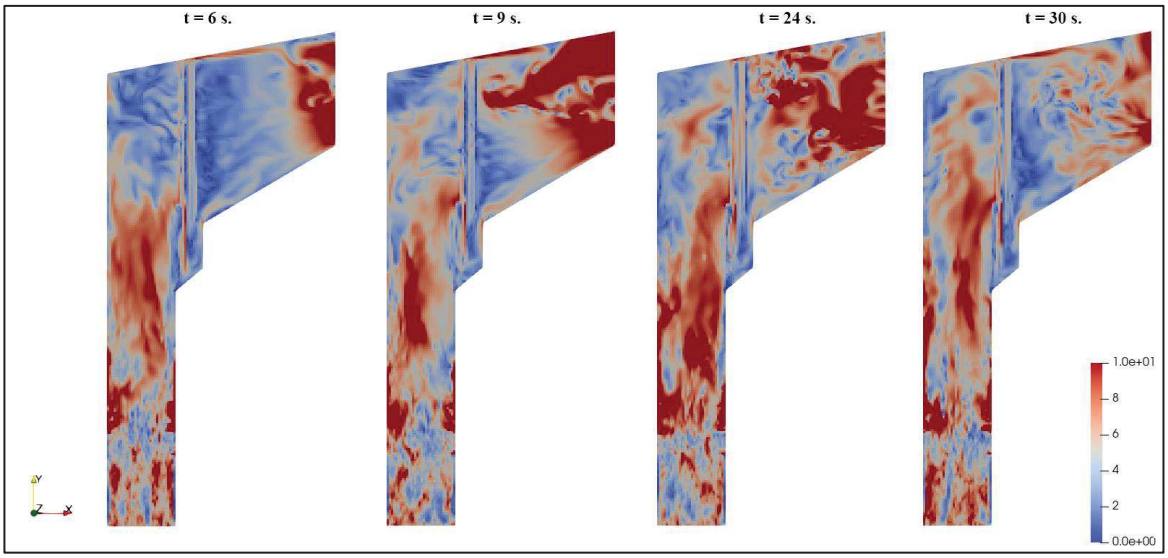
### 4.2.4. Mevcut tasarımın sayısal çözümleri ve tespit edilen problemler

Sayısal model doğrulaması yaparken de kullanılan mevcut tasarımda Şekil 4.13'te gözlemlendiği gibi kazan duvarlarında ortalama hızların yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.18'de kazan duvarlarındaki gaz hızlarının zaman-ortalamalı konturları verilmiştir. Yüksek gaz hızları, aynı zamanda partiküllerin duvarlara yüksek hızda çarpmasına sebep olduğundan borulara (su duvarlarına) ve çevresindeki yalıtım malzemesine zarar vermektedir.



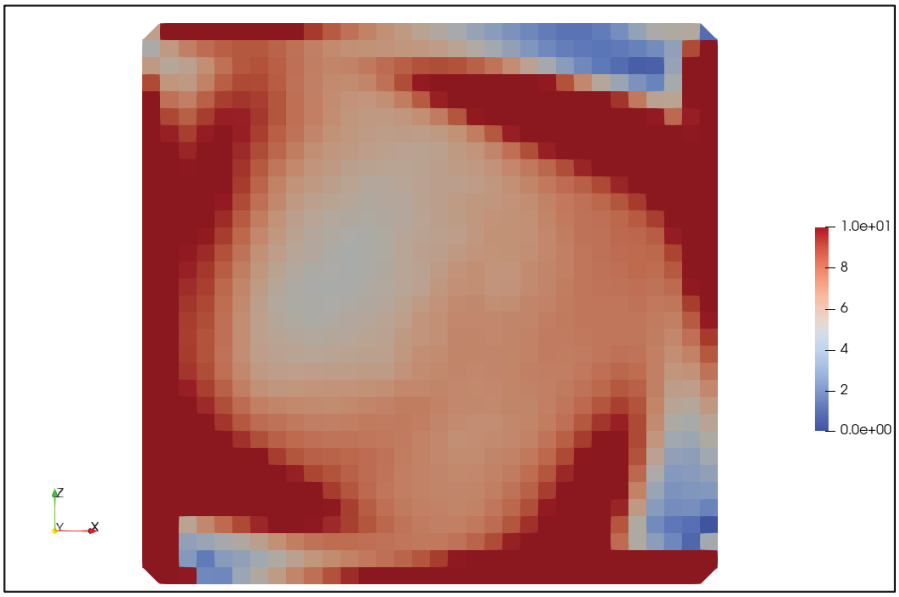

Şekil 4.18. Dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı duvarlarındaki zaman-ortalamalı gaz hızı değerleri (her bir hız konturu için sol alt köşesinde eksen verilmiştir.)

Şekil 4.19'da ön görünüşte simetri ekseninden alınmış kesit için hız konturları verilmiştir. Zaman adımları incelendiğinde akışkan yataklarda beklendiği gibi orta bölgelerde hızların yüksek olduğu ancak ikincil hava besleme noktalarından itibaren duvar bölgelerinde de hızların sürekli olarak yüksek olduğu görülmüştür. Her bir zaman adımı için duvar bölgelerindeki hız profilleri, Şekil 4.18'deki zaman ortalamalı profillerle uyuşmaktadır.




Şekil 4.19. Ön görünüş simetri ekseninden alınmış kesitteki gaz hız konturları

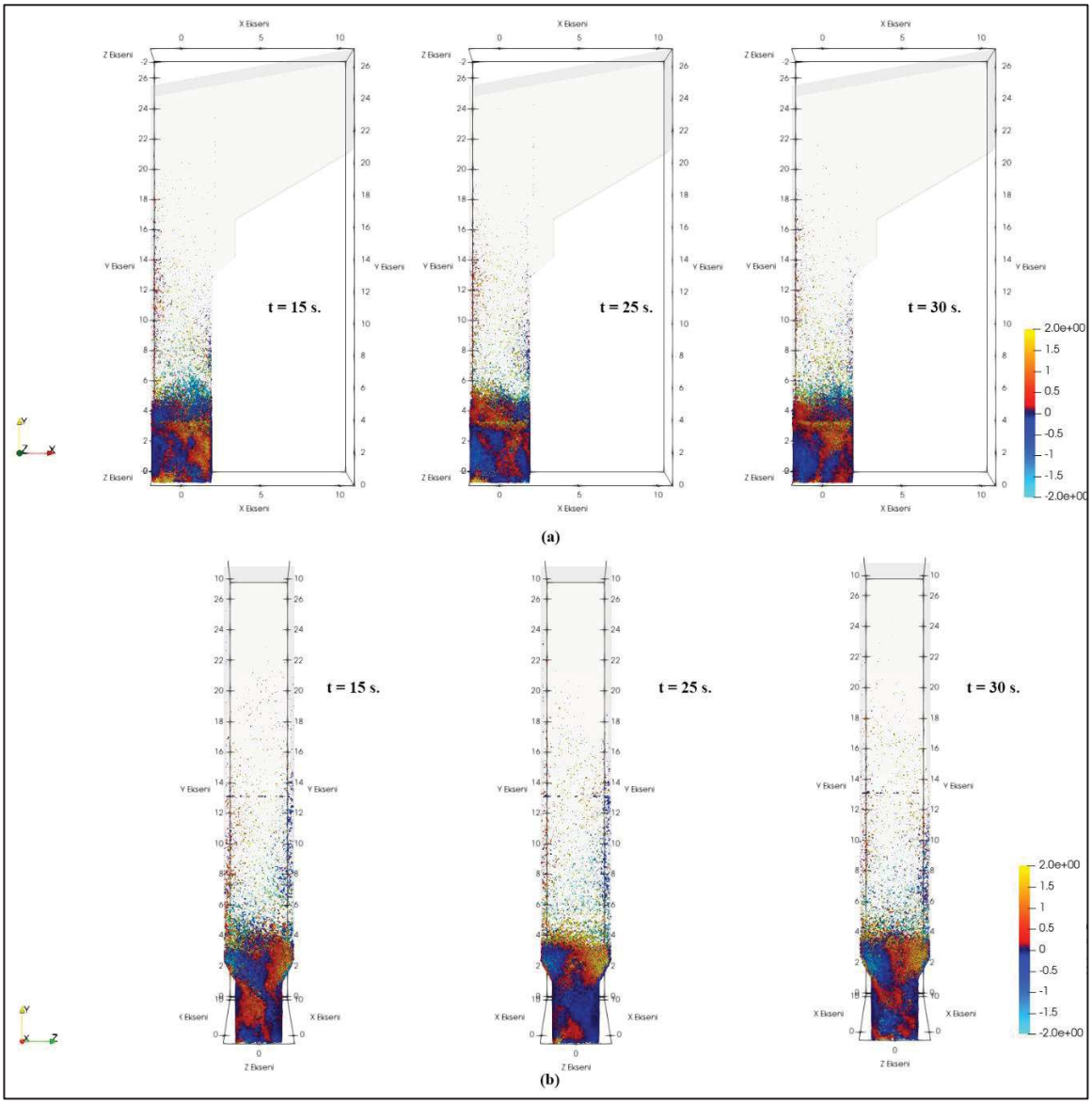
Şekil 4.20'de H=7 m yüksekliği için yatay eksende, zaman ortalamalı gaz hız konturları kesiti gösterilmiştir. Yatak içindeki gazların, ikincil hava nozulları etkisiyle vorteks oluşturduğu ve hızların duvara yakın bölgelerde yüksek hızda oldukları gözlemlenmiştir. Yatay eksendeki bu hız konturu; düşey kesitlerde ve duvar bölgesinde gözlemlenen gaz hızları ile alakalı sorunun oluşan vorteksler kaynaklı olduğunu doğrulamaktadır.




Şekil 4.20. H=7 m yüksekliği için zaman ortalamalı gaz hız konturu

Şekil 4.21'de xy ve yz eksenleri için partiküllerin yatay (duvar-duvar eksenli) hız dağılımları verilmiştir. Partiküllerin yoğun bölge üstünde duvarlara yakın hareket ettikleri gözlenmiştir. Ayrıca duvara neredeyse bitişik partiküllerin yatay hızlarının sıfır veya sıfıra

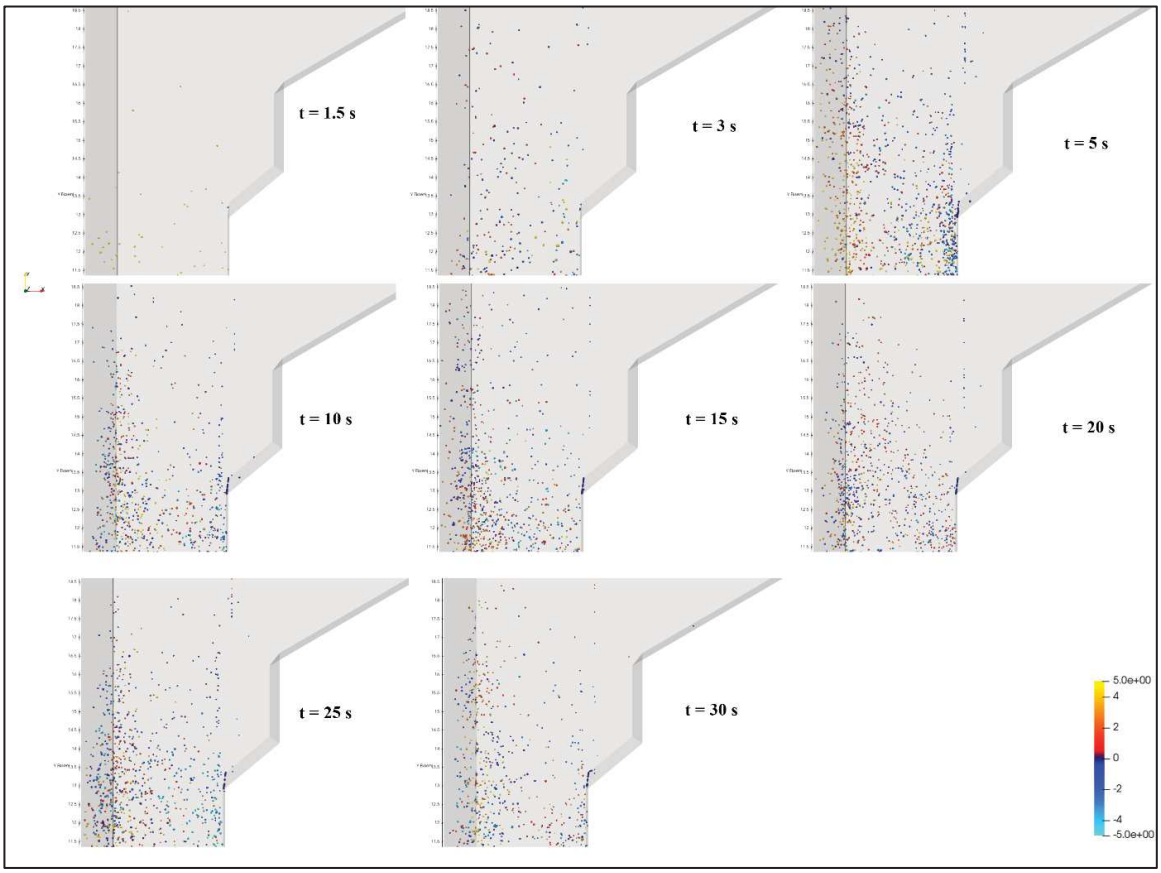
yakın olduğu gözlemlenirken, partiküllerin duvarlara yaklaşma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.




Şekil 4.21. Farklı zaman adımları için anlık partikül dağılımı (a) xy-ekseni görüntüsü için $V_x$ partikül hızları (b) yz-ekseni için $V_z$ partikül hızları

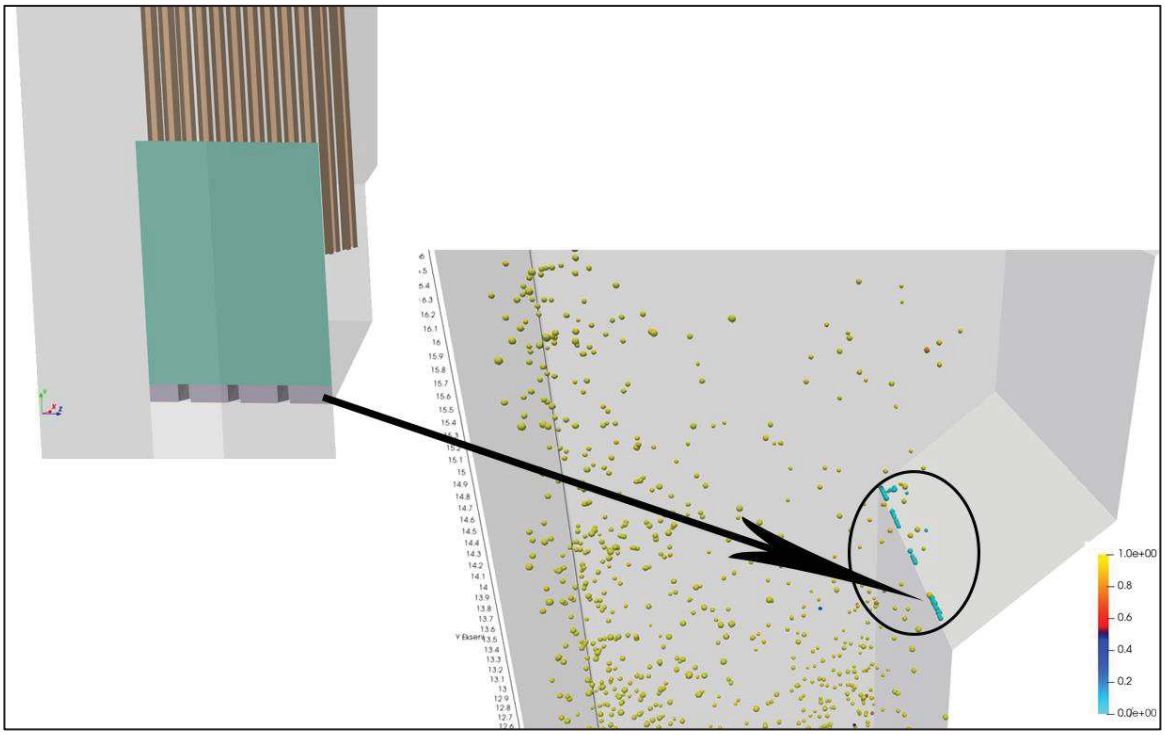
Ayrıca Şekil 4.22'de verildiği üzere dönüş bölgesine yeterli parçacık ulaşamadığı, dolaşımın yeterli düzeyde sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ikincil hava nozullarının yatay açılı yerleştirilmesi, partiküllerin duvar ve birbirleriyle olan etkileşimleri sonucu enerjilerini kaybetmelerinden dolayı eksenel hızlarında düşüşlere sebep olması olduğu tahmin edilmektedir.

Dönüş bölgesini ayıran duvarlar ve U-kirişler iç yüzey olarak tanımlandığı için MFiX yazılımının çıktısı olarak bu yüzeyler görüntülenememektedir. Yüzeylerin konumu ve yerleşimi Şekil 4.5'te verilmiştir.




Şekil 4.22. Dönüş bölgesi için partiküllerin farklı zaman adımlarındaki y doğrultusundaki $V_y$ partikül hızları (görüntü H = 11,5 m ve H = 18,5 m aralığında alınmıştır.)

Şekil 4.23'te dönüş bölgesi duvarının ve U-kirişlerin yerleşimleri gösterilmiştir. Ayrıca hareketli ve hareketsiz partiküllerin gözlemlenebilmesi için t = 30 s anındaki partikül hızları 0 m/s – 1 m/s aralığında renklendirilmiştir. Her bir zaman adımı için duvar bölgesi incelendiğinde deliklerin dolaşıma katkısının olduğu gözlemlenmiştir. Ancak yukarıdan aşağıya düşüşler olurken, bazen partiküllerin deliklerden aşağıdan yukarıya (soldan sağa) hareket ettiği ve sirkülasyonda kararsızlık yarattığı da gözlemlenmiştir.




Şekil 4.23. Dönüş bölgesi duvarının gösterimi ve hareketli/hareketsiz partiküllerin hızları

## 4.3. Mevcut Tasarımda Bulunan veya Öngörülen Problemler İçin İyileştirme Önerileri

Akışkan yataklarda tasarımı yapılan sistem büyüdükçe -özellikle endüstriyel ölçekte- yapılacak değişikliklerin sonuçlarını öngörmek; maliyeti optimum seviyede tutmak ve tasarım değişikliklerinde beklenmeyen sonuçlarla karşılaşmamak için oldukça önemlidir.

Bölüm 4.2'de tez kapsamında incelenmiş olan sirkülasyonlu akışkan yataklı buhar kazanının hidrodinamiği, psüdo-yanma şartlarıyla soğuk model benzetmesi [50] yapılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile doğrulanmış ve incelenmiştir.

Sayısal çözümler sonucu görülen ve deneysel gözlemlerle de örtüşen problemler şu şekildedir:

1. Yanma için gereken gaz hızları analitik olarak hesaplandığında gereken yanma şartlarını ve partikül dolaşımını sağlamaya uygun olmasına rağmen partikül dolaşımı yetersiz kalmaktadır.

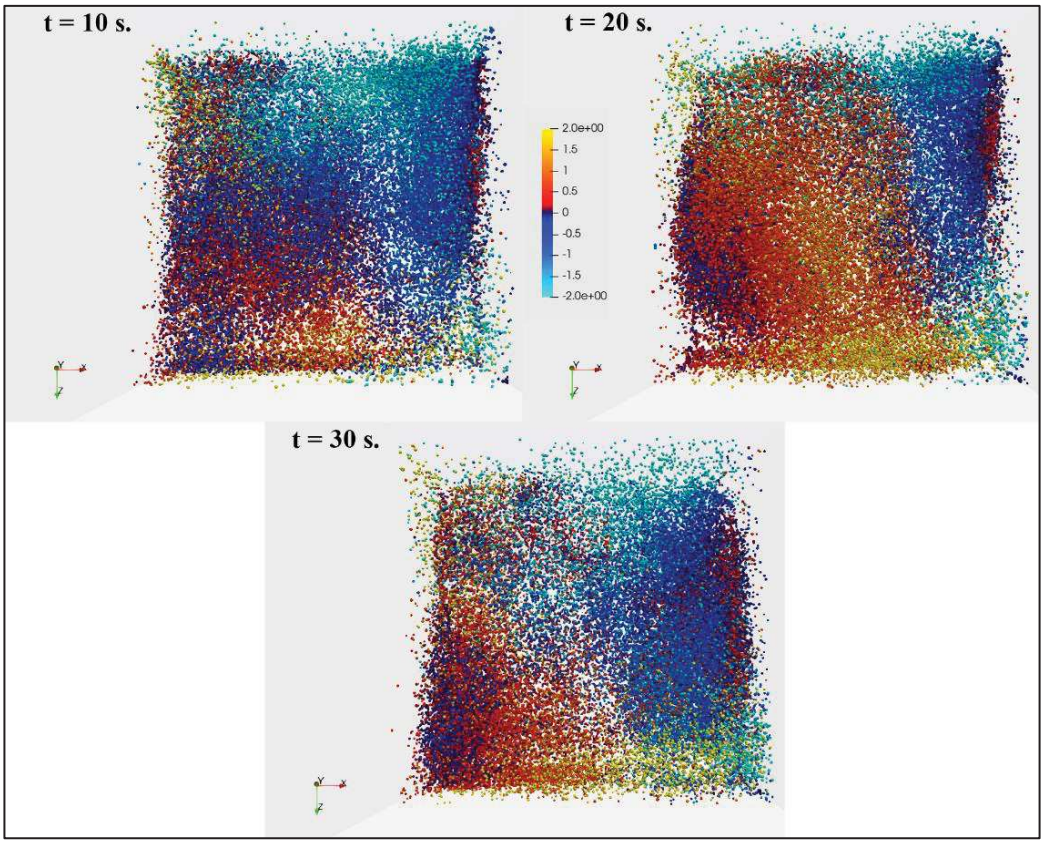
2. Partikül dolaşımının mevcut şartlarda sağlandığı haliyle dönüş bölgesi duvarlarında birikmeler olmaktadır. Ayrıca dönüş deliklerinde zaman zaman olması gerekenin aksine aşağıdan yukarı (soldan sağa) partikül taşınması gözlemlenmiştir. Mevcut delikler partikül dağılımının ve akışın kararsız olmasına sebep olabilmektedir.
3. Gaz hızlarının duvara yakın bölgelerde yüksek hızlara çıkması, akışkan yatak yapısında sorunlara yol açmakla birlikte su duvarlarında ve yalıtım malzemesinde aşınmalara yol açmaktadır.

Mevcut problemlerin çözümü için literatür ve teori incelenerek mühendislik yaklaşımı ile çeşitli iyileştirmeler önerilmiştir. Yapılacak tasarım değişiklikleri için dikkat edilen en önemli parametre birincil ve ikincil hava besleme debileridir. Buhar kazanından beklenen enerji çıktısını alabilmek için yanma parametrelerinin aynı kalması önemlidir. Bunun da tasarımdaki değişikliklerde, hava besleme debilerinin aynı kalması ile mümkün olacağı kabul edilmiştir.

Önerilen iyileştirmeler, doğrulanan model üzerinde uygulanarak sayısal çözümler yapılmıştır.

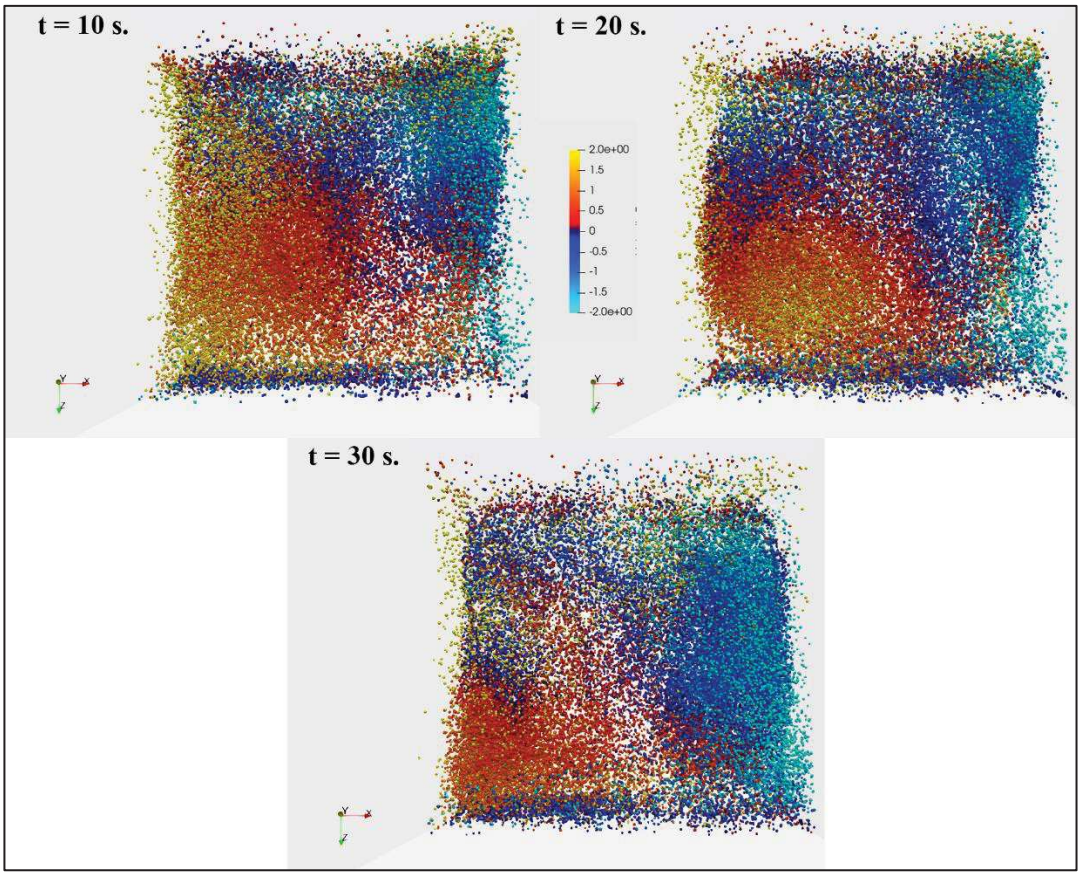
### 4.3.1. İyileştirme önerisi I (nozul yerleşiminin değiştirilmesi)

Mevcut problemler arasında duvar bölgesindeki malzemelerin hasar görmesi ve partikül dolaşımının beklenen seviyede olmaması bulunmaktadır. Sayısal çözümler sonucu bölgesel gaz hızı konturları ve partikül hareketleri incelendiğinde; ikincil hava nozullarının hava beslemesini yatay doğrultuda yapmasının gaz ve partiküllerin duvarla daha yüksek hızlarda etkileşime geçmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.24'te H = 4 m ve H = 6.2 m aralığındaki, xz düzleminde ana yatak bölgesindeki partiküllerin x yönlü ($V_x$) hızları verilmiştir.




Şekil 4.24. H = 4 m – H = 6.2 m aralığında ana yataktaki partiküllerin x yönlü (Vx) hızları

Şekil 4.25'te xz düzleminde ana yatak bölgesindeki partiküllerinde z yönlü (Vz) hızları verilmiştir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'deki partikül yatay hız dağılımları incelendiğinde partiküllerin, yatay düzlemde dairesel hareketlerle, duvarlarla etkileşime girerek hareketini devam ettirdiği gözlemlenmiştir.




Şekil 4.25. H = 4 m – H = 6.2 m aralığında ana yataktaki partiküllerin z yönlü (Vz) hızları

Partiküllerin duvarla yüksek hızda ve olması gerekenden daha sık etkileşime girmesi, bu bölgelerde çeşitli sorunlara (boruların ve yalıtım malzemesinin hasar görmesi gibi) yol açmakta ve partiküllerin yukarı taşınmasını zorlaştırmaktadır.

Resim 4.3'te mevcut kazanda hasar almış boruların kesit ve boy fotoğrafları verilmiştir. Kazan çalışma süresi boyunca boruların et kalınlığında incelmeler gözlemlenmiştir (solda). İncelme gözlemlenen bölgelere bakım esnasında zırh yapılarak önlenmek istenmiş ancak kesin çözüm olmadığı gözlemlenmiştir (solda ve sağda). Bu sorunun kök nedeni kazan üreticisi tarafından ikincil hava besleme bölgesinde bir vorteks oluşturulması sonucu katı partiküllerin duvar borularına çarpmasıdır. Bu çarpmalar sonucunda su duvarı borularında erozyon oluşmuş ve boru et kalınlıkları azalarak boru patlamalarına neden olmuştur.



Resim 4.3. Hasar almış ve önlem amaçlı zırh eklenmiş su boruları

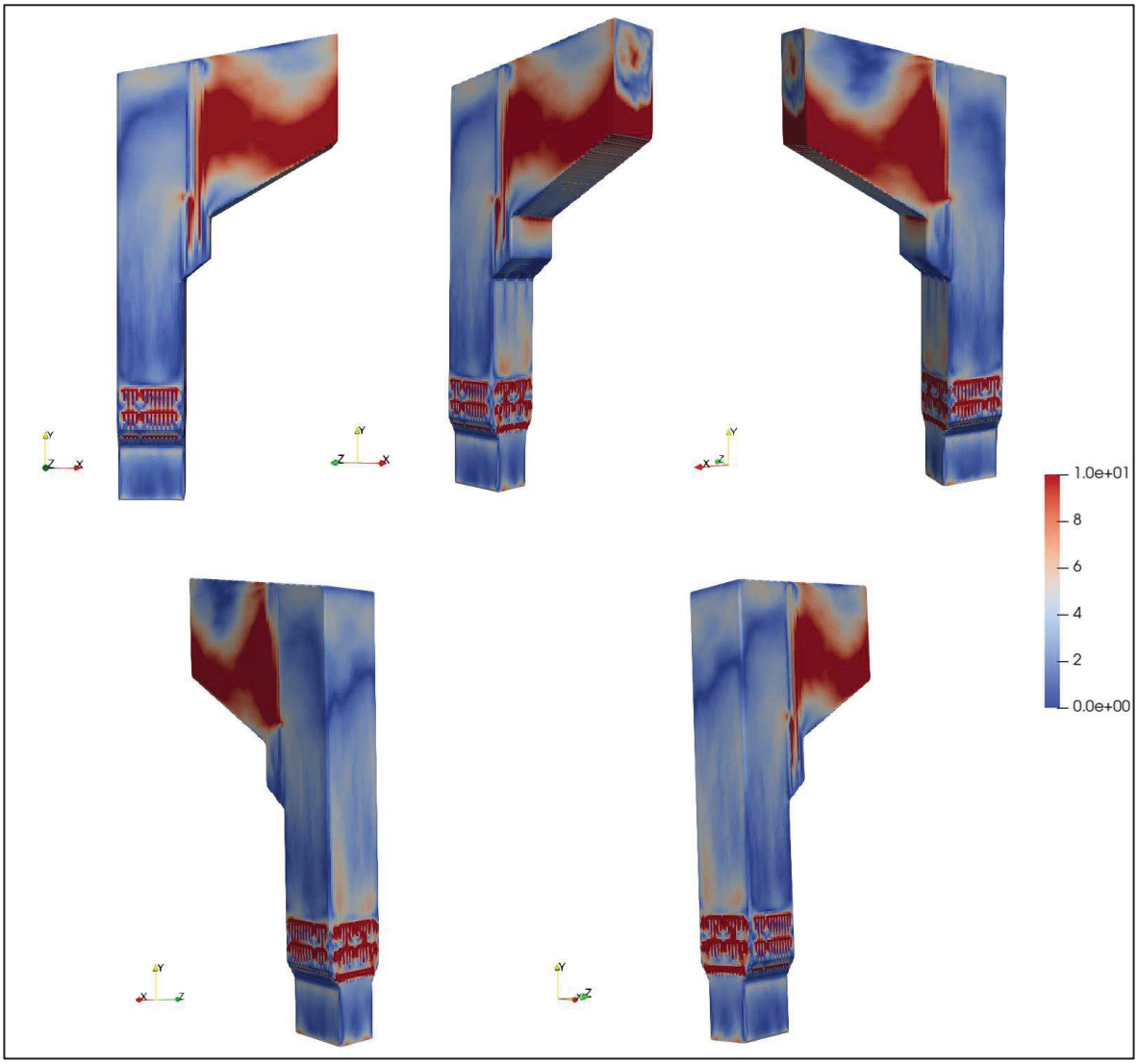
Bölüm 4.3'te belirlenen 1. ve 3. sorunların sebebinin nozullardan gelen ikinci besleme havasının yatay yönlü hareketinden kaynaklandığı kabul edilmiştir. Sorunların çözümü için nozulların yatay yerine dikey yerleştirilmesi (yüzey normalinden sağ tarafa doğru yerine yüzey normalinden aşağı doğru) ve 20° açının düşey olarak verilmesi önerilmiştir.

İyileştirme önerisi I sayısal sonuçları

İyileştirme önerisi I için yapılmış olan sayısal çözüm için bölüm 4.2.1'de tanımlanmış olan model kullanılmıştır. Sayısal modelin doğruluğu ve kararlılığı için sonuçların ilk 5 saniyelik kısmı hesaplamalardan çıkarılmıştır. Modelde yapılan tek değişiklik daha önce de belirtildiği gibi ikincil hava besleme nozullarının yüzey normaliyle aşağı yönlü 20° açı olacak şekilde yerleştirilmiş olmasıdır.

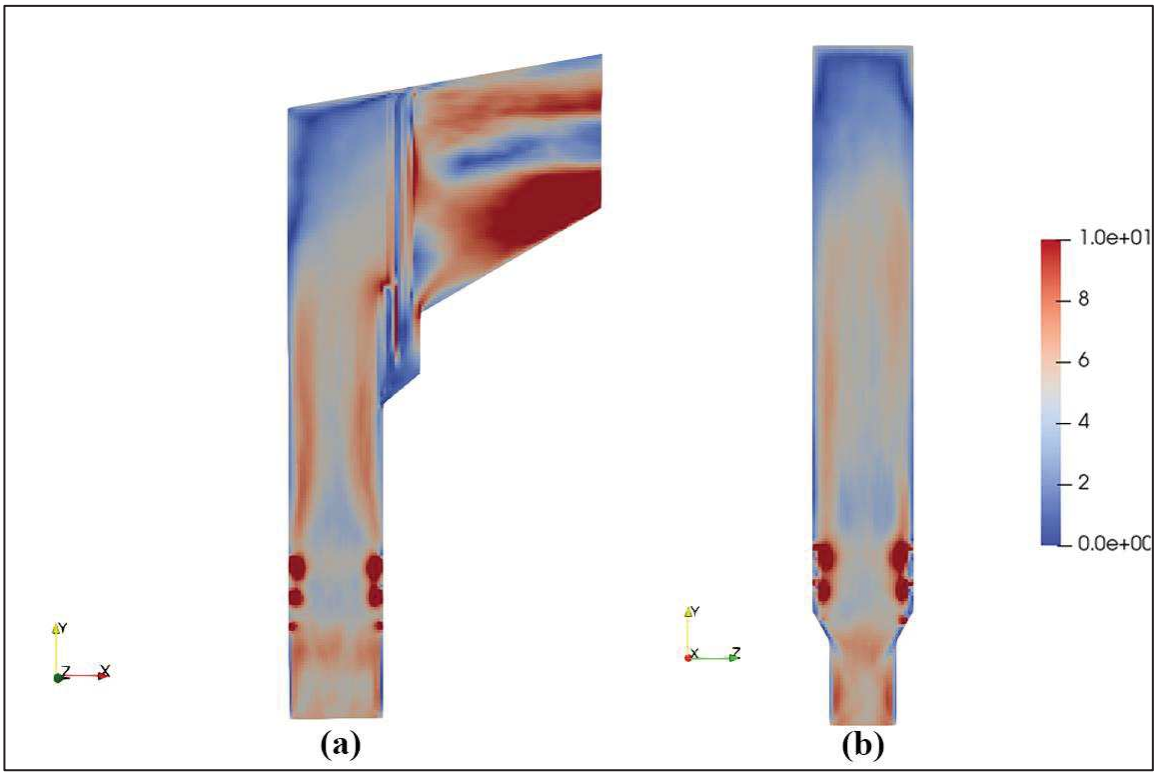
Deneysel ve sayısal sonuçlardan elde edilen veriler ve gözlemler duvar bölgesinde yüksek hızların oluştuğunu göstermekte idi. Şekil 4.26, iyileştirme önerisi I kapsamında önerilen değişiklik sonucu duvar bölgelerindeki zaman ortalamalı gaz hızı konturlarını göstermektedir. Nozulların yatay yerleştirildiği ilk durum Şekil 4.18'in aksine, Şekil 4.26'da duvar bölgesindeki hızların 0 m/s değerine yaklaştığı görülmektedir. Yatak

genişleme bölgesindeki duvar bölgesinde görülen yüksek hızlar ise ikincil hava besleme nozullarının yerleşimlerinden kaynaklanmaktadır.



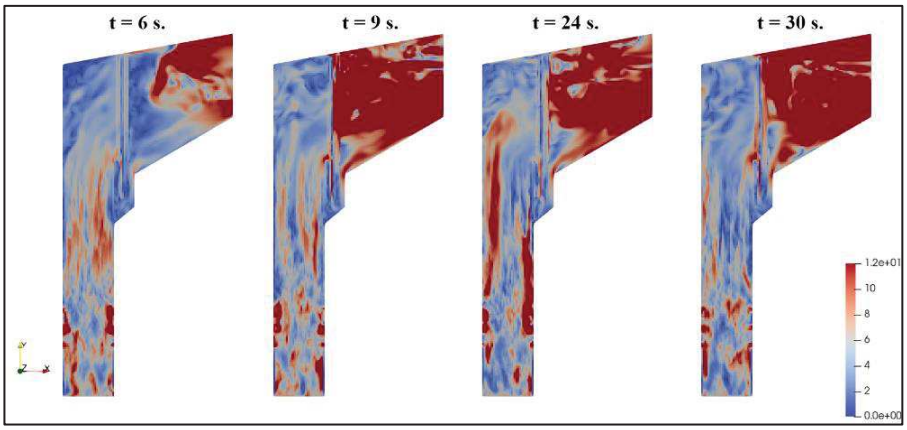

Şekil 4.26. Dikey açılı nozul yerleşimi için akışkan yataklı buhar kazanı zaman ortalamalı duvar hız konturları

Şekil 4.27'de simetri eksenlerinden alınmış kesitler için gaz hızı konturları verilmiştir. Yatak genişleme bölgesinin hemen üstünde ortalama hızın 10 m/s üzerine çıktığı görülen kırmızı üçer nokta, ikincil havanın kademeli olarak verildiği nozulların olduğu bölgelere denk gelmektedir.



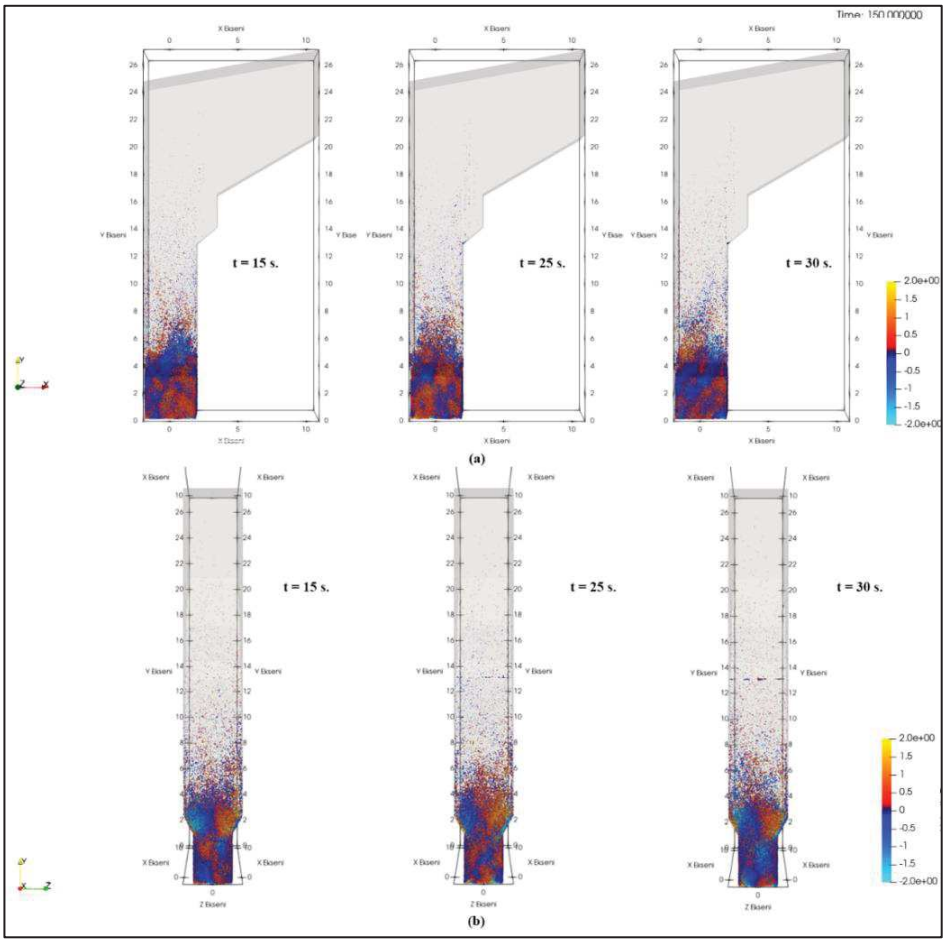

Şekil 4.27. Dikey açılı nozul yerleşimi için merkez simetri kesiti zaman ortalamalı gaz hız konturları (a) ön görünüş (xy) (b) sol görünüş (zy)

Şekil 4.28'de farklı zaman adımlarındaki gaz hızı konturları verilmiştir. Dikey açılı nozul yerleşiminde gaz hızlarının bazı zaman adımlarında merkezde, bazı zaman adımlarında ise duvardan biraz uzakta en yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.26'daki duvar şartları ve Şekil 4.28 birlikte incelendiğinde, duvarlara yakın bölgedeki hız yükselmelerinin duvarları fazla etkilemediği görülmektedir. Ayrıca gaz hızlarının dönüş bölgesini geçtikten sonra yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebinin gaz ve partiküllerin duvar ile etkileşiminin önceki duruma göre azalmasından dolayı kayıpların azalması ve gazın dönüş bölgesine daha yüksek hızlarda ulaşması olduğu tahmin edilmektedir. U-kirişlerin yerleşiminden dolayı oluşan dar gaz geçiş bölgeleri, çıkışta yüksek hızlara sebep olmaktadır. Dolaşımlı akışkan yataklı kazanın dönüş bölgesinden sonraki bu bölgesinde ısı transfer boruları (kızdırıcılar, vb.) olduğu için sabit sıcaklık kabulü ile yapılan sayısal çözümde buradaki hızların olması gerekenden yüksek çıktığı düşünülmektedir.



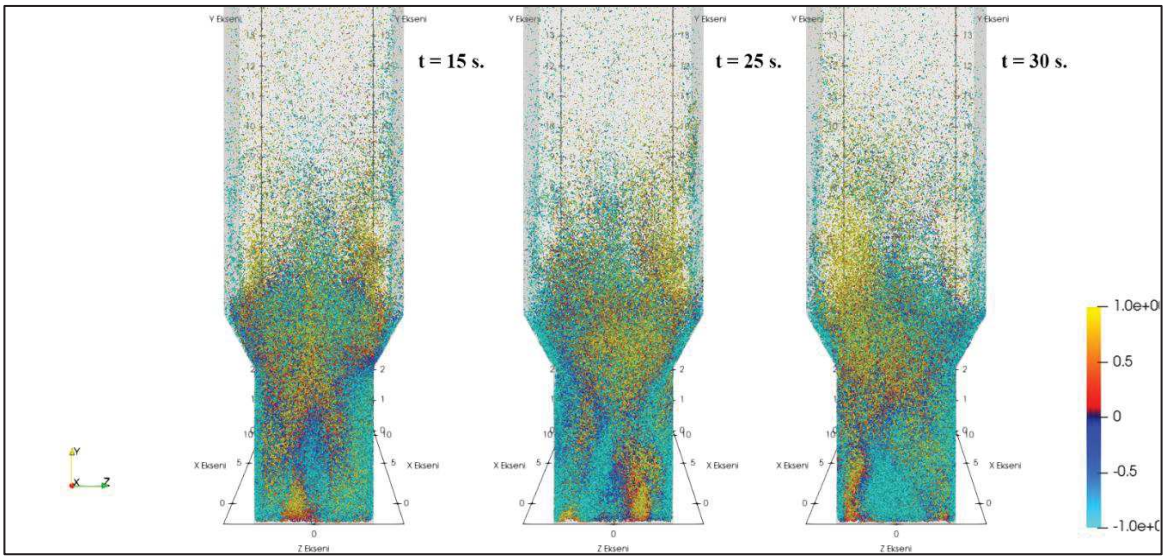

Şekil 4.28. Dikey açılı nozul yerleşimi için ön görünüş merkez simetri ekseni farklı zaman adımlarındaki gaz hız konturları

Şekil 4.29'da akışkan yatağın farklı zaman adımlarının anlık görüntülerine ait ön görünüşleri için Vx, sol görünüşleri için Vz partikül hızları ve partikül dağılımları verilmiştir.



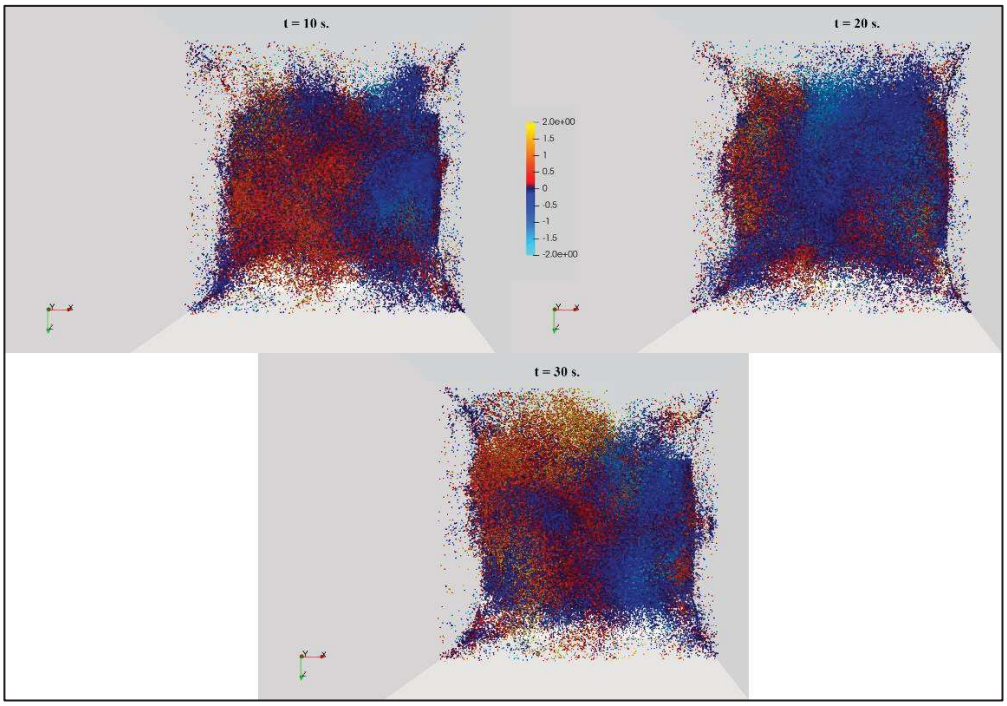

Şekil 4.29. Dikey açılı nozul yerleşimi için farklı zaman adımlarında anlık partikül dağılımı (a) xy-ekseni görüntüsü için Vx partikül hızları (b) yz-ekseni için Vz partikül hızları

Şekil 4.30'da 15., 25. ve 30. saniye için eksenel (y-yönlü) partikül hız dağılımları verilmiştir. Partiküllerin hareket yönünü göstermek için $V_y$ hız aralıkları renklendirmesi – 1 m/s – 1 m/s olarak belirlenmiştir. Her bir zaman adımı incelendiğinde partiküllerin yatağın orta bölgesinde yükseliş, duvar bölgelerinde düşüş eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir.




Şekil 4.30. Dikey açılı nozul yerleşimi için farklı zaman adımlarında eksenel (y-yönlü) partikül hız dağılımları

Şekil 4.31'de t= 10 s., 20 s. ve 30 s. zaman adımlarında ana yataktaki partiküllerin H = 2 m – H = 6.2 m aralığı için x yönlü (Vx) hızları verilmiştir. Zaman adımlarındaki partikül dağılımı incelendiğinde partiküllerin büyük oranda yatağın orta kısımlarında olduğu görülmektedir. Duvar bölgelerinde ise partiküllerin, köşelerde daha çok bulunduğu gözlemlenmektedir. Vx hızları ise -2 m/s ve 2 m/s aralığında renklendirme yapılmış olsa da gözlemlenen bölge için yatay hızların limit değerlere ulaşmadığı görülmektedir.

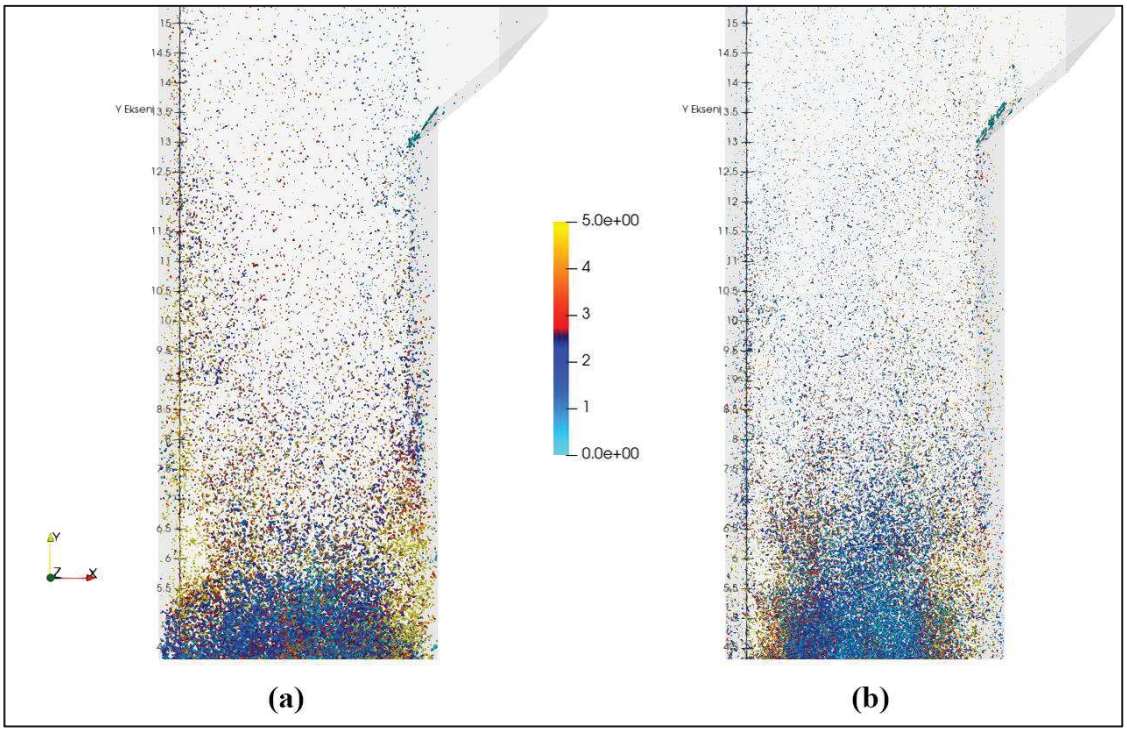



Şekil 4.31. Dikey açılı nozul yerleşimi için H = 2 m – H = 6.2 m aralığında ana yataktaki partiküllerin x yönlü (Vx) hızları

İyileştirme önerisi I'in mevcut probleme etkisi

Tasarım iyileştirme önerisi I'in çözmesi beklenen problem akışkan yatak duvarlarında gözlenen yüksek gaz ve partikül hızları ve dolaşımın yeterince sağlanamaması olarak planlanmıştır. Bu başlık altında mevcut tasarım ve önerilen tasarım karşılaştırılarak, yeni tasarımın etkisi incelenmiştir.

Şekil 4.32'de mevcut durum ve iyileştirme önerisi I için yapılmış iki farklı sayısal çözüm sonuçları gösterilmektedir. Akışkan yatak çalışma sırasında, 4 m – 4,5 m aralığına yükselmekte, daha yukarılarda ise partiküllerin sıçramaları gözlemlenmektedir. Partikül dolaşımının net bir şekilde gözlemlenebilmesi için 4,5 m – 15 m aralığı incelenmiştir. Mevcut durumda partiküllerin duvarlara yakın, yüksek hızlı olması daha önce de belirtildiği üzere problem teşkil etmektedir. Yapılan tasarım değişikliği ile partiküllerin yatağın orta bölgesine toplandığı Şekil 4.32 (b)'de gözlemlenmektedir.




Şekil 4.32. H = 4,5 m - H = 15 m aralığındaki partiküllerin anlık dağılımları ve hız profilleri (t = 25 s.) (a) mevcut durum (b) iyileştirme önerisi I

Çizelge 4.9'da üç farklı yüzey için ortalama partikül kütlesinin değişimi verilmiştir. Kütle miktarları hesaplanırken, belirlenen yüzeylerden her bir zaman adımındaki partikül kütlesi alınarak ortalama değer dikkate alınmıştır. H = 3 m yüksekliği, yatağın birincil hava ile yükselmesinden sonra sabit kaldığı yükseklikler içinde olduğundan iki durumda da partikül miktarında değişiklik gözlemlenmemiştir. Ancak H = 8 m ve dönüş bölgesi katı miktarları incelendiğinde, sırasıyla %202,69 ve %247,017'lik artışlar gözlemlenmiştir. Bu artış miktarları, tasarım değişikliğinin yatak yapısını büyük oranda değiştirmeden partiküllerin yatak üst bölgelerine taşındığını ve sirkülasyonun iyileştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.9. Mevcut durum ve iyileştirme önerisi I, üç farklı yüzeydeki karşılaştırmalı ortalama partikül kütleleri

| | **H = 3 m** | **H = 8 m** | **Dönüş Bölgesi** |
|---|---|---|---|
| Mevcut Durum | 176,1556 kg | 1,95975 kg | 0,02967 kg |
| İyileştirme Önerisi I | 169,51519 kg | 5,93203 kg | 0,10296 kg |
| Değişim | -%3,77 | +%202,69 | +%247,017 |

Çizelge 4.10'da farklı H yükseklikleri için zaman ortalamalı partikül hacim kesirlerinin iki durum için de karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. Yatak içindeki katı hacim kesri, $\varepsilon_s$ hesaplanırken Eş. 4.16 kullanılmıştır.

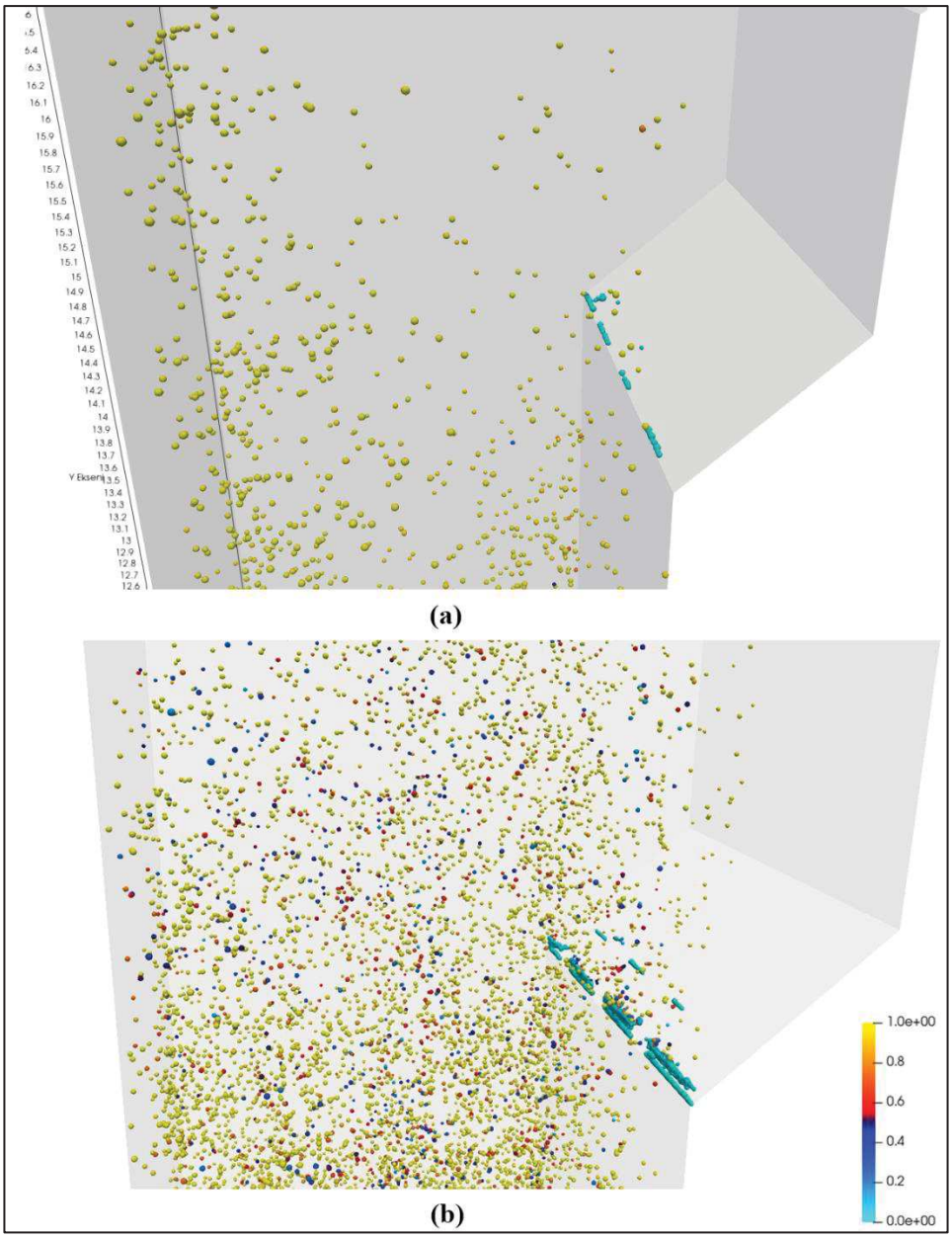
$$\varepsilon_s = 1 - \varepsilon_g \tag{4.16}$$

Değişim yüzdeleri incelendiğinde Şekil 4.32 ve Çizelge 4.9'da gözlemlenmiş sonuçlarla uyuşarak yatağın H = 4 m – 5 m aralığına kadar büyük oranda katı madde değişimi olmadığı görülmüştür. Tasarım önerisinin partiküllerin yatağın üst kısmına taşınmasında etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.10. Yatak tabanından itibaren farklı H yükseklikleri için karşılaştırmalı ortalama partikül hacim kesirleri

| **Yükseklik (H)** | **Mevcut Durum İçin $\varepsilon_s$** | **İyileştirme Önerisi I İçin $\varepsilon_s$** | **Değişim** |
|---|---|---|---|
| 1 m | 0,1156 | 0,1122 | -%2,96 |
| 2 m | 0,0886 | 0,0849 | -%4,11 |
| 3 m | 0,0633 | 0,0619 | -%2,31 |
| 4 m | 0,0268 | 0,0261 | -%2,81 |
| 5 m | 0,0056 | 0,0067 | +%21,11 |
| 6 m | 0,0017 | 0,0033 | +%94,95 |
| 7 m | 0,00072 | 0,0025 | +%242,26 |
| 8 m | 0,00050 | 0,0015 | +%191,25 |
| 9 m | 0,00039 | 0,00093 | +%141,97 |
| 10 m | 0,00031 | 0,00067 | +%118,36 |
| 11 m | 0,00022 | 0,00047 | +%112,27 |
| 12 m | 0,00015 | 0,00035 | +%129,87 |

Şekil 4.33 dönüş bölgesi (H = 12 m üzeri) için mevcut durum ve iyileştirme önerisi I sonrası partikül dağılımını göstermektedir. Partikül hızları, duran ve hareketli partikülleri gözlemleyebilmek için Vp = 0 m/s – 1 m/s aralığında renklendirilmiştir. Şekil 4.33 (b) incelendiğinde mevcut duruma kıyasla daha yüksek sayıda partikülün yatağın üst bölgelerine taşındığı gözlemlenmektedir. Partikül taşınmasındaki artış, aynı zamanda sirkülasyonu sağlayan duvarın deliklerinin etrafındaki partikül artışına sebep olmuştur.




Şekil 4.33. Tasarım iyileştirme önerisi I'in dönüş bölgesindeki partikül dolaşımına etkisi (a) mevcut durum (b) iyileştirme önerisi I

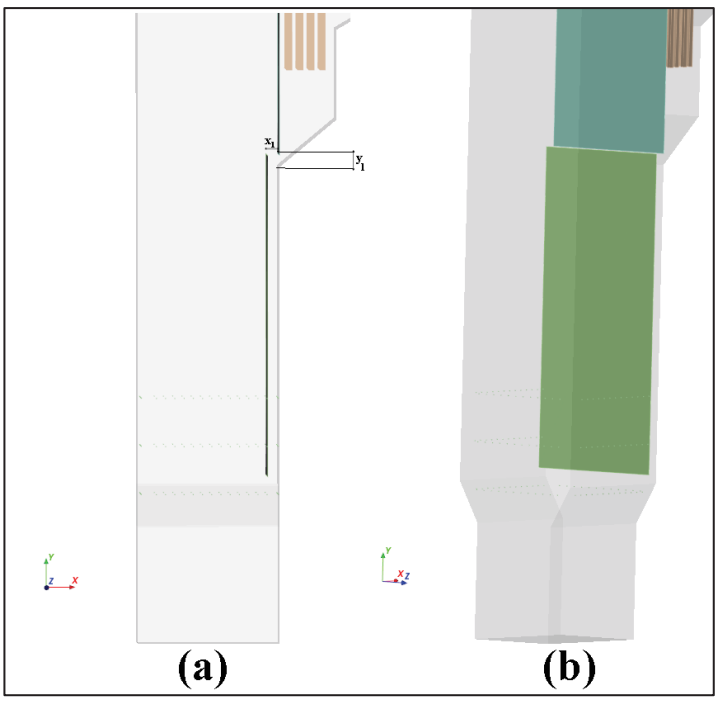
### 4.3.2. İyileştirme önerisi II (ayırıcı iç duvar eklenmesi)

Mevcut problemlerin çözümü için tasarımda yapılacak ilk önerinin sonuçları Bölüm 4.3.1'de tartışılmıştır. Yapılan ilk tasarım değişikliği ile duvarlardaki sorunlara ve partiküllerin yatağın üst bölgesine taşınmasına çözüm bulunabileceği görülmüştür. Ancak geri dönüş bölgesindeki ayırıcı duvarda bulunan delik çevresinde partikül birikimi görülmeye devam etmektedir. Mevcut durumda partikül miktarı düşük olduğu için Şekil

4.23'teki gibi gözlemlenen biriken partikül miktarı; önerilen tasarım değişikliği sonucu dolaşım miktarının artması sonucu Şekil 4.33 (b)'deki hale gelmiştir.

Deliklerin etrafında oluşan partikül birikmesini önlemek için, dönüş bölgesini ana yataktan ayıran duvarın delikler etrafındaki kısmının kaldırılması önerilmiştir. Ancak, önceki sonuçlarda da gözlemlendiği ve beklendiği üzere akışın x-yönlü hızının artacağı ve dönüş bölgesinde kararsızlık oluşacağı öngörülmüştür. Harici siklon yapısına benzer bir düşüş bölgesi oluşturmak için, duvardan delik yüksekliği kadar uzağa ayırıcı bir duvar eklenmiştir. Ayırıcı duvar, dönüş bölgesinden yataktaki katı partikülün yükseldiği bölgeye kadar (H = 4,5 m) yerleştirilmiştir. Şekil 4.34'te iyileştirme önerisi II için tasarımda yapılan değişiklikler, yeni iç yüzeylerin yerleşimi gösterilmiştir. Dönüş bölgesindeki duvarla kazan duvarının arasındaki yükseklik $y_1$ ve yeni eklenen iç duvarla kazan duvarı arasındaki uzaklık $x_1$, sırasıyla 0,318 m ve 0,318 m olarak belirlenmiştir. Ayırıcı duvarın YZ ekseni için ölçüleri (8,69 m x 3,746 m) olarak tanımlanmıştır.

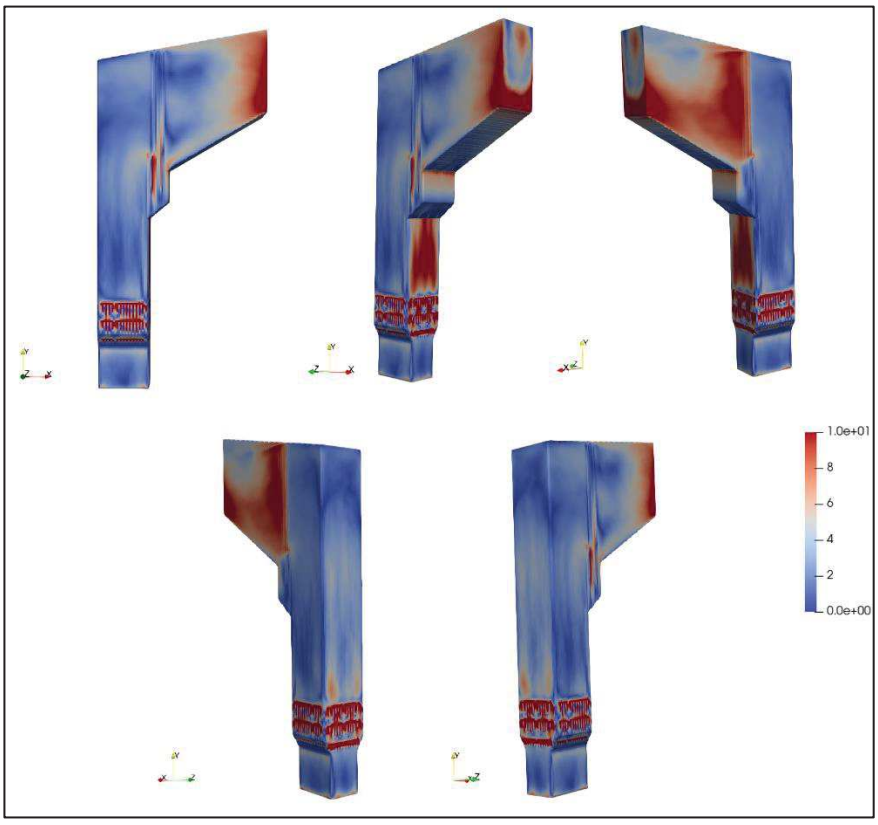
İç yüzeylerde yapılan değişiklikler dışındaki tüm çalışma şartları iyileştirme önerisi I ile aynı olacak şekilde tanımlanmıştır.




Şekil 4.34. İyileştirme Önerisi II için iç yüzeylerin yerleşimi (a) ön görünüş (b) izometrik görünüş

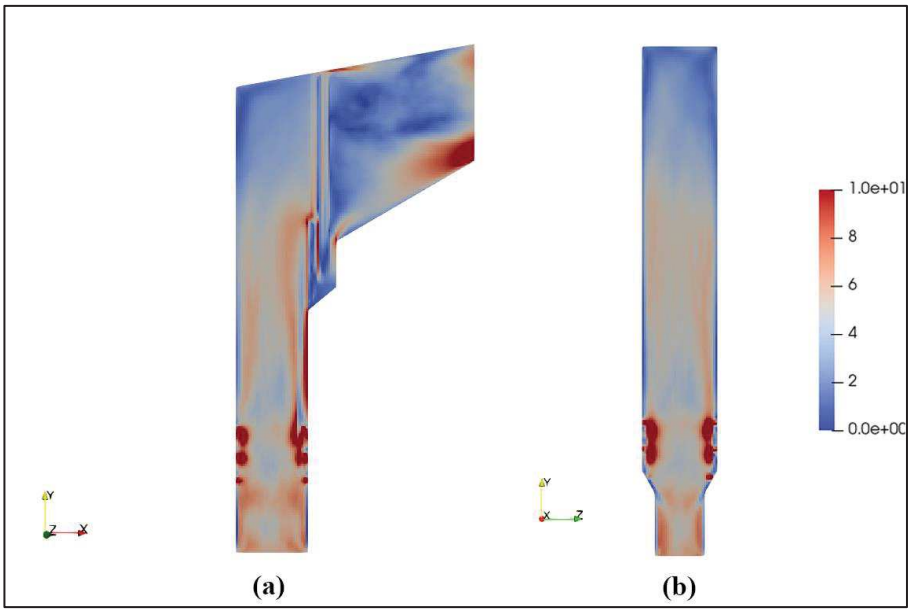
İyileştirme önerisi II sayısal sonuçları

İyileştirme önerisi II için duvar bölgelerindeki gaz hız konturları Şekil 4.35'te verilmiştir. Hız konturları incelendiğinde ikincil hava nozullarının çevresi ve atmosfer çıkışı dışında hız değerlerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca düşüş bölgesinde kalan duvarda gaz hızlarının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Düşüş bölgesindeki hızların yüksek olması, alanın daralmasıyla açıklanabilir ancak bu İyileştirme önerisi I ile çözüm bulunan su duvarlarının hasar görmesi probleminin tekrar oluşmaması için partikül hızları da ayrıca incelenmiştir.



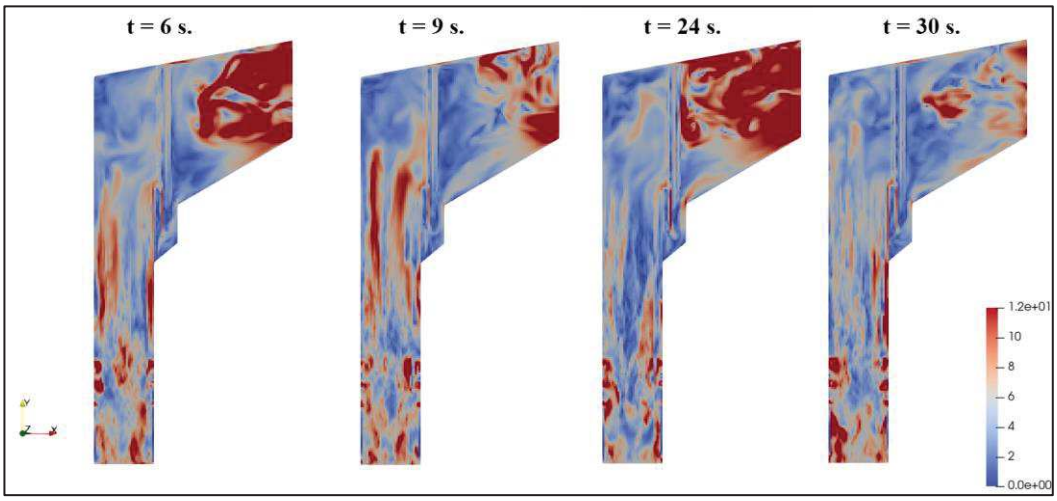

Şekil 4.35. İyileştirme önerisi II için akışkan yataklı buhar kazanı zaman ortalamalı duvar hız konturları

Şekil 4.36'da iyileştirme önerisi II için merkez kesitlerden alınmış zaman ortalamalı gaz hızı konturları verilmiştir. Gaz hızlarının dönüş bölgesindeki duvar haricinde 0 m/s hıza yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca üçüncü kademedeki ikincil hava besleme nozullarından çıkan havanın ayırıcı iç duvarın altından, ana yatağın yükseliş kısmına dönüş yaptığı gözlemlenmiştir.



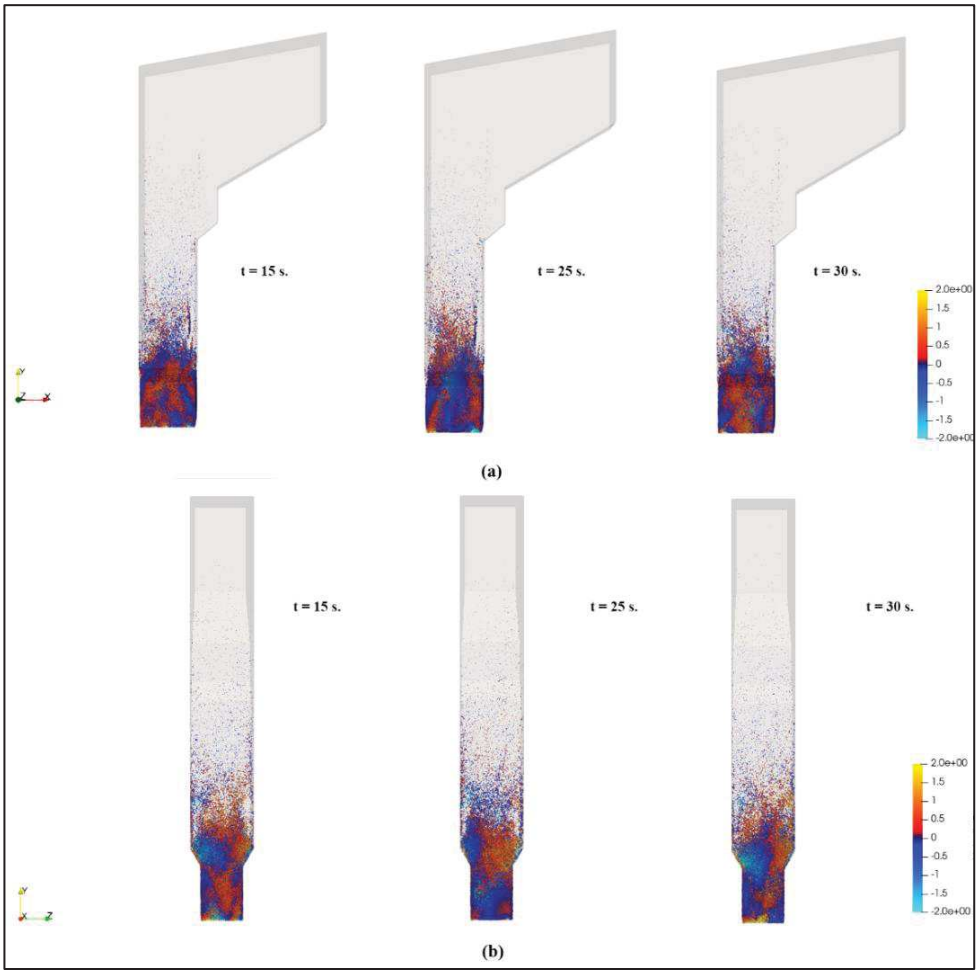

Şekil 4.36. İyileştirme önerisi II için merkez simetri kesiti zaman ortalamalı gaz hız konturları (a) ön görünüş (xy) (b) sol görünüş (zy)

Şekil 4.37'de iyileştirme önerisi II için farklı zaman adımlarındaki anlık gaz hız konturları verilmiştir. Gaz hızlarının çoğunlukla merkez bölgede ve akışkan yatak çıkışında yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Farklı zaman adımlarında düşüş bölgesi duvarında gaz hızlarının yükseldiği gözlemlenmiştir; ancak sürekli olarak yüksek hızlarda kalmadığı ve anlık olarak yükselip düştüğü görülmüştür. Dönüş bölgesi ve dönüş bölgesi duvarı arasındaki bölgedeki gaz hızları, partiküllerin yükseldiği ana yatak bölgesine kıyasla daha düşük durumda olmaktadır. Bununla birlikte kademeli ikincil hava besleme debilerinin, Şekil 4.36'da da gözlemlendiği üzere duvardan merkeze doğru yöneldiği gözlemlenmiştir.




Şekil 4.37. İyileştirme önerisi II için ön görünüş merkez simetri ekseni farklı zaman adımlarındaki gaz hız konturları

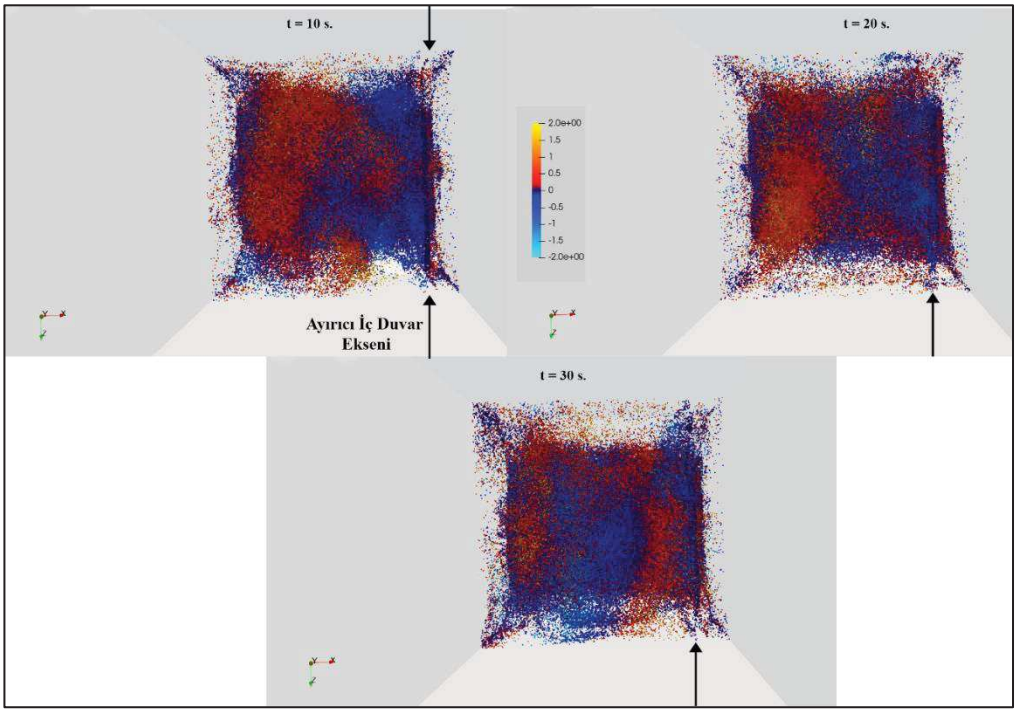
Şekil 4.38'de iyileştirme önerisi II için akışkan yatağın farklı zaman adımlarının anlık görüntülerine ait ön görünüşleri için Vx, sol görünüşleri için Vz partikül hızları ve partikül dağılımları verilmiştir. Şekil 4.38 (a) incelendiğinde partiküllerin ayırıcı iç duvarın ana yatak (yükseliş) tarafında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da görülen yüksek gaz hızlarının partikül yatay hızlarına etkisinin düşük olduğu gözlemlenmiştir.




Şekil 4.38. İyileştirme önerisi II için farklı zaman adımlarında anlık partikül dağılımı (a) xy-ekseni görüntüsü için Vx partikül hızları (b) yz-ekseni için Vz partikül hızları

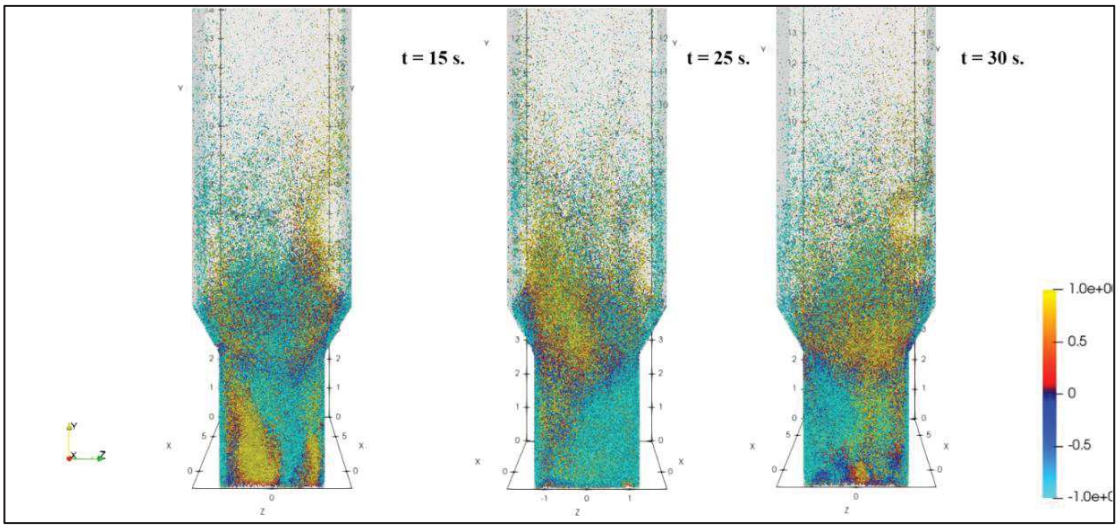
Şekil 4.39'da iyileştirme önerisi II için H = 2 m – H = 6,2 m aralığındaki partiküllerin x-yönlü hızları verilmiştir. Partiküllerin yatay hızları ($V_x$) incelendiğinde farklı zaman adımları için hızların büyük miktarda -1 m/s – 1 m/s aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ayırıcı iç duvar – kazan duvarı arasındaki bölgedeki partiküllerin x yönlü hızlarının – 0,5 m/s – 0,5 m/s arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Düşüş bölgesindeki gaz hızlarının

yüksek olmasının, partiküllerin yatay hızlarını artırmadığı gözlemlendiği için, x yönlü düşük hızlı partiküllerin kazan duvarına zarar vermeyeceği öngörülmüştür.



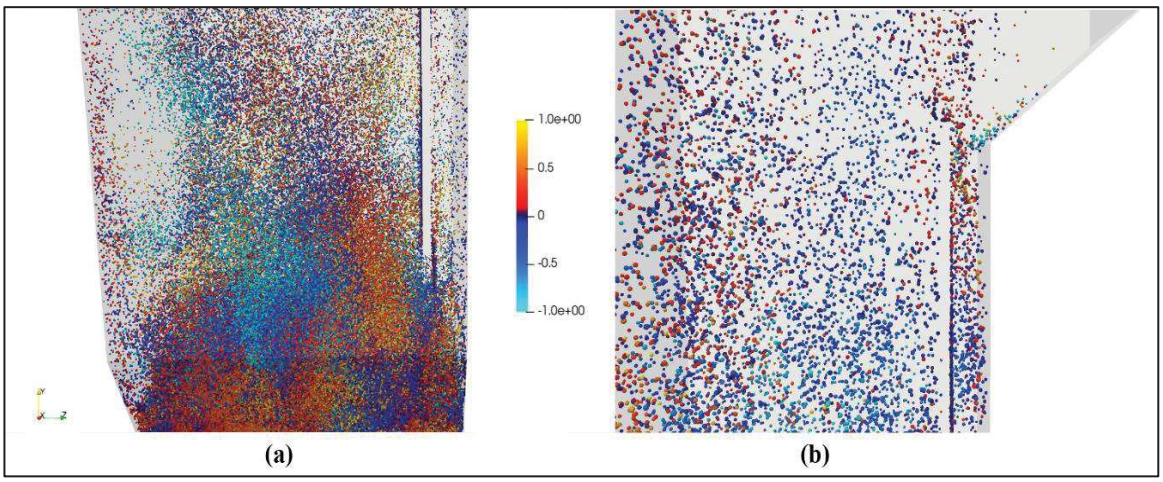

Şekil 4.39. İyileştirme önerisi II için H = 2 m – H = 6,2 m aralığında ana yataktaki partiküllerin x yönlü (Vx) hızları

Şekil 4.40'ta 15., 25. ve 30. saniye için eksenel (y-yönlü) partikül hız dağılımları verilmiştir. Partiküllerin hareket yönünü göstermek için $V_y$ hız aralıkları renklendirmesi – 1 m/s – 1 m/s olarak belirlenmiştir. Her bir zaman adımı incelendiğinde partiküllerin yatağın orta bölgesinde yükseliş, duvar bölgelerinde düşüş eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir.




Şekil 4.40. İyileştirme önerisi II için farklı zaman adımlarında eksenel (y-yönlü) partikül hız dağılımları

İyileştirme önerisi II ile yapılan tasarım değişikliği, iç ayırıcı duvar eklenmesi ve dönüş bölgesi delikleri etrafındaki duvarların kaldırılması olmuştur. Yapılan tasarım değişikliği yakından incelendiğinde eskiden delik olan bölgedeki partiküllerin -x yönlü (sağdan sola) hareket ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca iç ara duvar ile kazan duvarı arasında kalan (düşüş bölgesi) partiküllerin x yönlü $V_x$ hızlarının -0,5 m/s – 0,5 m/s aralığında olduğu Şekil 4.41'deki gibi gözlemlenmiştir. Daha iyi gözlemlenebilmesi için partiküller, ölçeklendirilerek büyütülmüştür.




Şekil 4.41. İyileştirme önerisi II için akışkan yatağın farklı bölgelerinde partiküllerin x-yönlü ($V_x$) hızları (a) yükselme bölgesi (b) dönüş bölgesi

### 4.3.3. Mevcut tasarım ve iyileştirme önerilerinin karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında MFiX-PIC ile hidrodinamik yapısı incelenmiş üç farklı tasarım için farklı yüksekliklerdeki yüzeylerden alınmış ortalama partikül kütleleri Çizelge 4.11'de verilerek karşılaştırılmıştır. Mevcut tasarımda tespit edilen problemlerden biri partikül dolaşımının yeterli miktarda olmaması olarak belirlenmiştir. İyileştirme önerisi I ve iyileştirme önerisi II ile dolaşımın H= 8 m ve dönüş bölgesi için arttığı belirlenmiştir. Mevcut durumla öneri I ve II karşılaştırıldığında sırasıyla, H= 3 m için -%3,77 ve -%3,97, H= 8 m için +%202,69 ve +%225,15, dönüş bölgesi için +%247,017 ve +%250,59 olarak gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.11. Üç farklı tasarım sonuçları için üç farklı yüzeydeki karşılaştırmalı ortalama partikül kütleleri

| | **H = 3 m** | **H = 8 m** | **Dönüş Bölgesi** |
|---|---|---|---|
| Mevcut Durum | 176,1556 kg | 1,95975 kg | 0,02967 kg |
| İyileştirme Önerisi I | 169,51519 kg | 5,93203 kg | 0,10296 kg |
| İyileştirme Önerisi II | 169,17179 kg | 6,37216 kg | 0,10402 kg |
| Değişim M»I | -%3,77 | +%202,69 | +%247,017 |
| Değişim M»II | -%3,97 | +%225,15 | +%250,59 |
| Değişim I»II | -%0,20 | +%7,42 | +%1,03 |

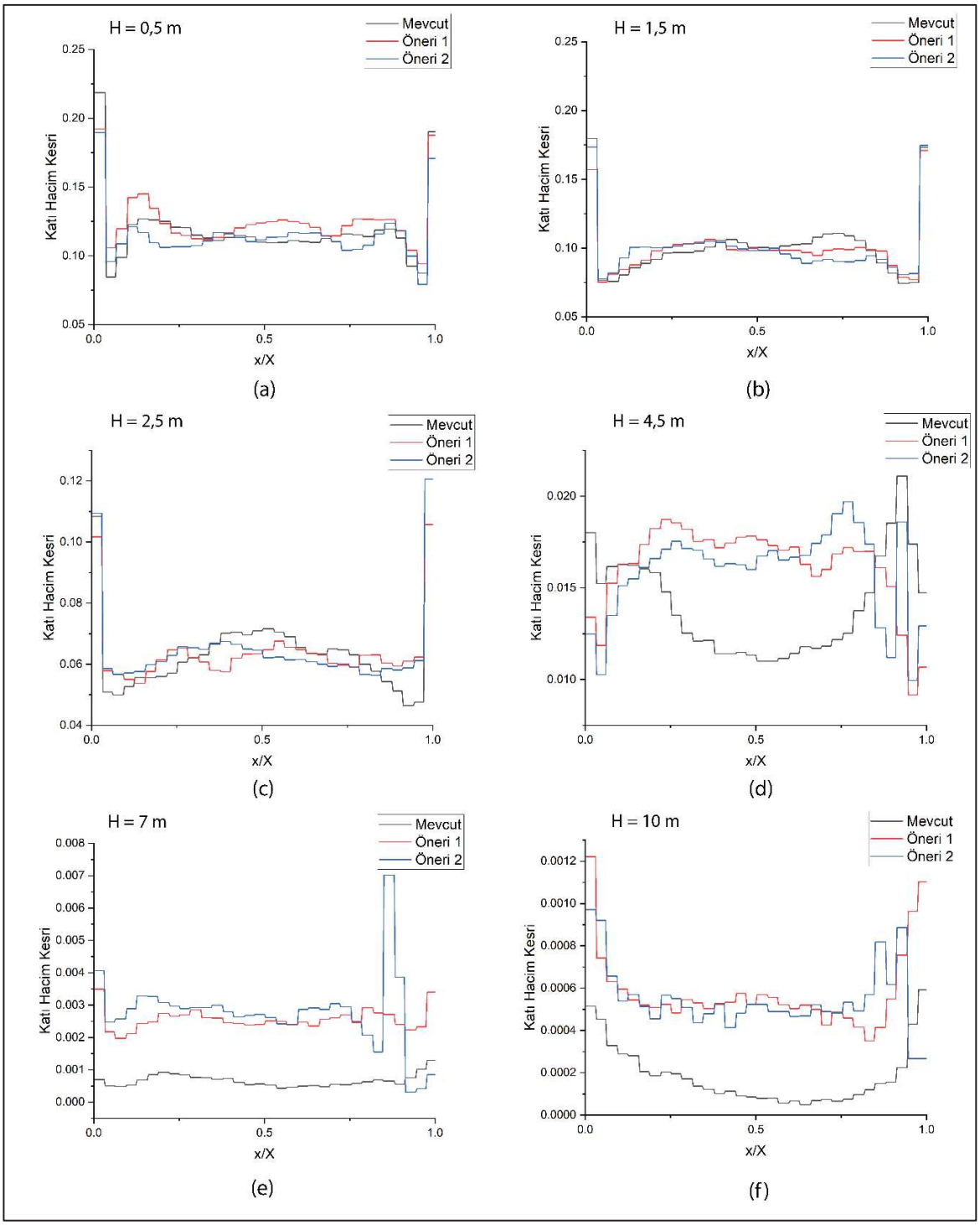
Farklı yükseklikler için Eş. 4.16 ile hesaplanmış partikül hacim kesirleri $\varepsilon_s$, Çizelge 4.12'de verilmiştir. İyileştirme önerisi I ve II ile yatak malzemesinin H= 4 m yüksekliğinden itibaren, akışkan yatağın üst bölgelerine taşındığı görülmüştür.

Tasarım I ile II arasındaki değişim incelendiğinde sırasıyla 1 m ve 2 m için %0,62 ve %1,41 artış, 3 m ve 4 m için %0,65 ve %4,60 azalış gözlemlenmiştir. H = 10 m yüksekliğine kadar artışlar, 10 m – 12 m aralığında ise azalma gözlemlenmiştir. H = 12 m'de iyileştirme önerisi I ve II için ortalama partikül hacim kesirleri eşit seviyededir. H = 4 m ve altındaki değişimin sebebinin iyileştirme önerisi II tasarımında bulunan, Şekil 4.34'te gösterilmiş ara duvar olduğu tahmin edilmiştir. Düşüş bölgesinden yatağa tekrar katılan partiküller, yatağın tabanına yaklaşarak tekrar yükselmeye geçmektedir.

Çizelge 4.12. Üç farklı tasarım için yatak tabanından itibaren farklı H yüksekliklerinde karşılaştırmalı ortalama partikül hacim kesirleri

| **Yükseklik (H)** | **Mevcut Durum İçin $\varepsilon_s$** | **İyileştirme Önerisi I İçin $\varepsilon_s$** | **İyileştirme Önerisi II İçin $\varepsilon_s$** | **Değişim M»I** | **Değişim M»II** | **Değişim I»II** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 m | 0,1156 | 0,1122 | 0,1129 | -%2,96 | -%2,34 | +%0,62 |
| 2 m | 0,0886 | 0,0849 | 0,0861 | -%4,11 | -%3,19 | +%1,41 |
| 3 m | 0,0633 | 0,0619 | 0,0615 | -%2,31 | -%2,84 | -%0,65 |
| 4 m | 0,0268 | 0,0261 | 0,0249 | -%2,81 | -%7,09 | -%4,60 |
| 5 m | 0,0056 | 0,0067 | 0,0069 | +%21,11 | +%23,21 | +%2,99 |
| 6 m | 0,0017 | 0,0033 | 0,0035 | +%94,95 | +%105,88 | +%6,06 |
| 7 m | 0,00072 | 0,0025 | 0,0026 | +%242,26 | +%261,12 | +%4,00 |
| 8 m | 0,00050 | 0,0015 | 0,0016 | +%191,25 | +%220,0 | +%6,67 |
| 9 m | 0,00039 | 0,00093 | 0,00094 | +%141,97 | +%141,03 | +%1,08 |
| 10 m | 0,00031 | 0,00067 | 0,00064 | +%118,36 | +%106,45 | -%4,48 |
| 11 m | 0,00022 | 0,00047 | 0,00044 | +%112,27 | +%100,0 | -%6,39 |
| 12 m | 0,00015 | 0,00035 | 0,00035 | +%129,87 | +%133,34 | |

Katı partiküllerin yatak içindeki davranışlarını anlamak için boşluk kesirlerinin ya da katı hacim kesirlerinin incelenmesi önem teşkil etmektedir. Şekil 4.42'de XY ekseninde, farklı yükseklikler için +x doğrultusunda katı partikül hacim kesrinin zaman ortalamalı değerleri, üç farklı tasarım için verilmiştir. Yüksekliğe bağlı incelemeler için seçilen yükseklik değerleri partikül hareketlerinin anlamlı çoğunlukta olduğu değerler dikkate alınarak seçilmiştir. İnceleme ve karşılaştırma için yatak alt bölgesi 0,5 m, 1,5 m, 2,5 m, partikül yükselme yüksekliği 4,5 m ve yatak orta ve üst bölgeleri 7 m ve 10 m belirlenmiştir.




Şekil 4.42. XY merkez simetri ekseninde farklı yükseklikler için x yönlü partikül katı hacim kesitleri H = a)0,5 m b)1,5 m c)2,5 m d)4,5 m e)7 m f)10 m

XY eksenindeki partikül dağılımları incelendiğinde 0,5 m için TÖ2'de kısmen orta bölgede yükselme görülse de 0,5 m ve 1,5 m için çok büyük değişiklikler olmadığı gözlemlenmiştir. 2,5 m yüksekliğinde mevcut durumda duvarlara yakın bölgelerde daha düşük katı hacmi gözlemlenirken orta bölgelere doğru katı hacminin yükseldiği gözlemlenmiştir. TÖ1 ve TÖ2 için 2,5 m yüksekliğinde ise benzer ters-U şekli

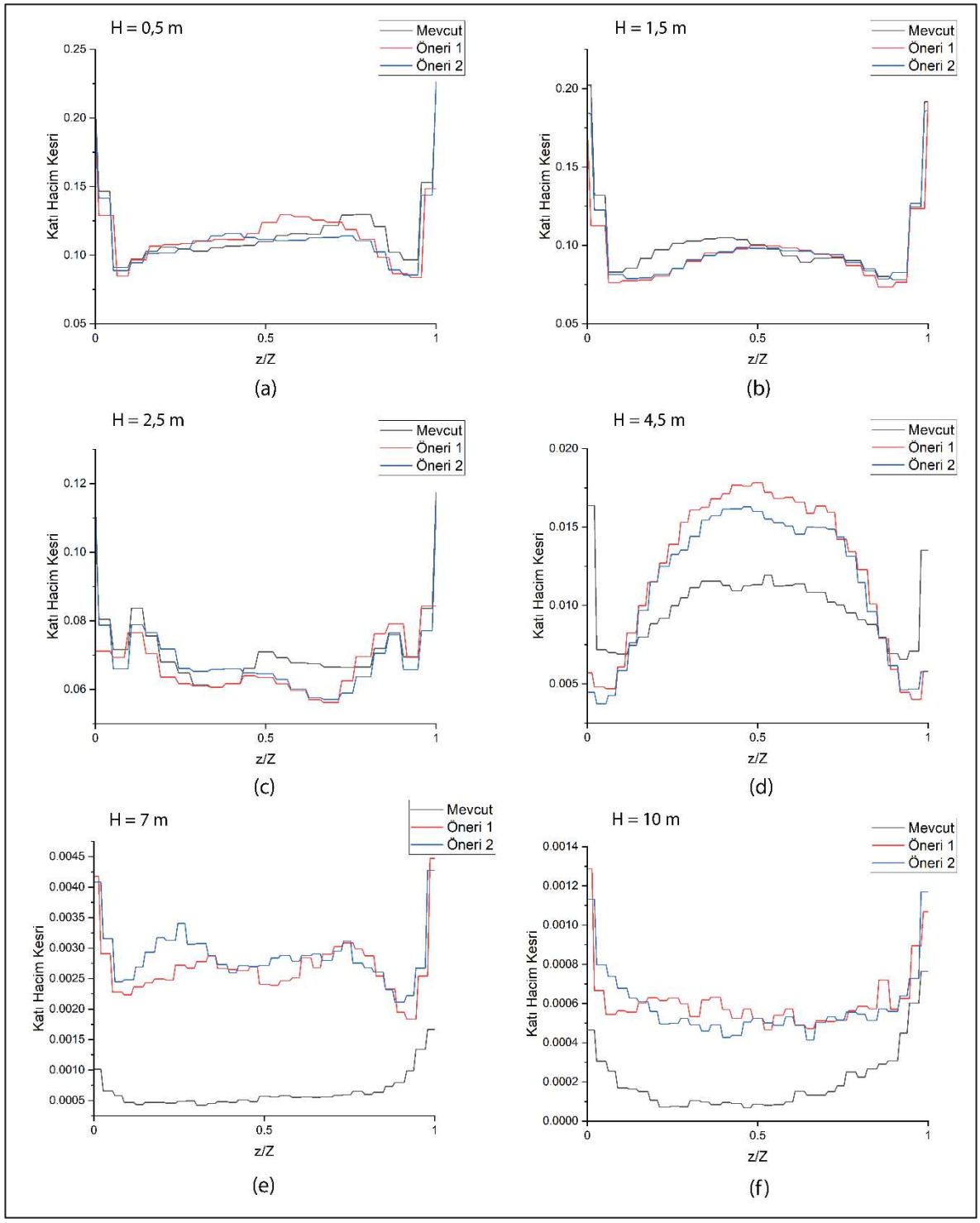
gözlemlenmiş olup, duvar bölgelerindeki katı hacminin orta bölgelere mevcut duruma göre daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. TÖ1 ve TÖ2'nin grafiklerinin şekil olarak birbirine benzemesi ve mevcut durumdan duvar bölgesinde ayrışmasının sebebinin ikincil hava nozullarının yatay yerine dikey yerleşimi olduğu düşünülmektedir.

Katı partiküllerinin akışkanlaşma ile birlikte yükselerek sıçrama yaptığı yükseklik olan 4,5 m incelendiğinde ise alt bölgelerdeki grafiklerdeki benzerliklerin aksine mevcut durum ile TÖ1 ve TÖ2 arasında büyük bir değişim gözlemlenmiştir. Mevcut durumda partikül dağılımının yatağın duvar bölgesinde yoğunlaşıp, orta bölgelerde azaldığı U şekli net bir şekilde gözlemlenmişken, TÖ1 ve TÖ2'de yatağın orta bölgesinde daha yoğun katı dağılımı gözlemlenmiştir. Ayrıca duvar bölgelerinde mevcut duruma kıyasla azalma gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebinin üç kademeli yerleştirilmiş nozulların düşey gaz hızlarının partikül dağılımını etkilemesi olduğu düşünülmektedir. +x yönünde sağ duvara yaklaşıldığında ise partikül dağılımında farklılıklar gözlemlenmiştir. Mevcut durum ve TÖ2 için sağ duvara yakın bölgede partikül hacim kesri yükselirken, TÖ1 durumunda azalmıştır. Mevcut durum ve TÖ1 arasındaki bu değişimin sebebinin; nozullardan çıkan havanın yönünün yataydan düşey konuma geçmesi olduğu düşünülürken, TÖ2'e eklenen ayırıcı duvarın bu bölgedeki partikül miktarını tekrar yükselttiği gözlemlenmiştir.

Yatağın, alt bölgeye kıyasla partikül yoğunluğunun daha az olduğu seyrek, üst bölgesi de (H= 7 m ve 10 m) partikül dağılımının değişimini gözlemlemek için incelenmiştir. Yoğun bölgeye kıyasla partikül miktarları az olsa da Çizelge 4.12 ile birlikte incelendiğinde oransal olarak büyük değişimler (+%242,26, +%118,36 gibi) olduğu gözlemlenmiştir. İki yükseklik değeri için de grafikler, miktarlar göz önüne alınmadığında benzer şekiller göstermektedir. Ancak TÖ2'de +x yönünde sağ duvara yakın bölgeye doğru anlık yükselmekte ve sonrasında düşmektedir. Grafikte H= 7 m'de mevcut durumdaki ve TÖ1'deki sırasıyla %0,1 ve %0,3'ten TÖ2'de %0,7'ye yükselen katı partikül hacim kesri, TÖ2'de ayırıcı duvar eklenen dikey çizgiye denk gelmektedir. Bu durum da göstermektedir ki TÖ2'de dönüş bölgesinden düşen partiküller, ayırıcı duvara çarpmakta ve yatak üst bölgelerinde sağ duvarla daha az etkileşime girmektedir.

Daha önceki bölümlerde ve şekillerde görüldüğü üzere yatak geometrisi XY ve ZY kesitlerinde farklı boyutlarda tasarlanmıştır. Katı hacim kesirlerinin farklı eksenlerde farklı sonuçlar göstereceği düşünüldüğünden, sonuçlar ZY ekseni için de incelenmiştir. Şekil

4.43'te ZY merkez simetri ekseninde, farklı yükseklikler için +z doğrultusunda katı partikül hacim kesrinin zaman ortalamalı değerleri, üç farklı tasarım için verilmiştir.




Şekil 4.43. ZY merkez simetri ekseninde farklı yükseklikler için z yönlü partikül katı hacim kesitleri H = a)0,5 m b)1,5 m c)2,5 m d)4,5 m e)7 m f)10 m

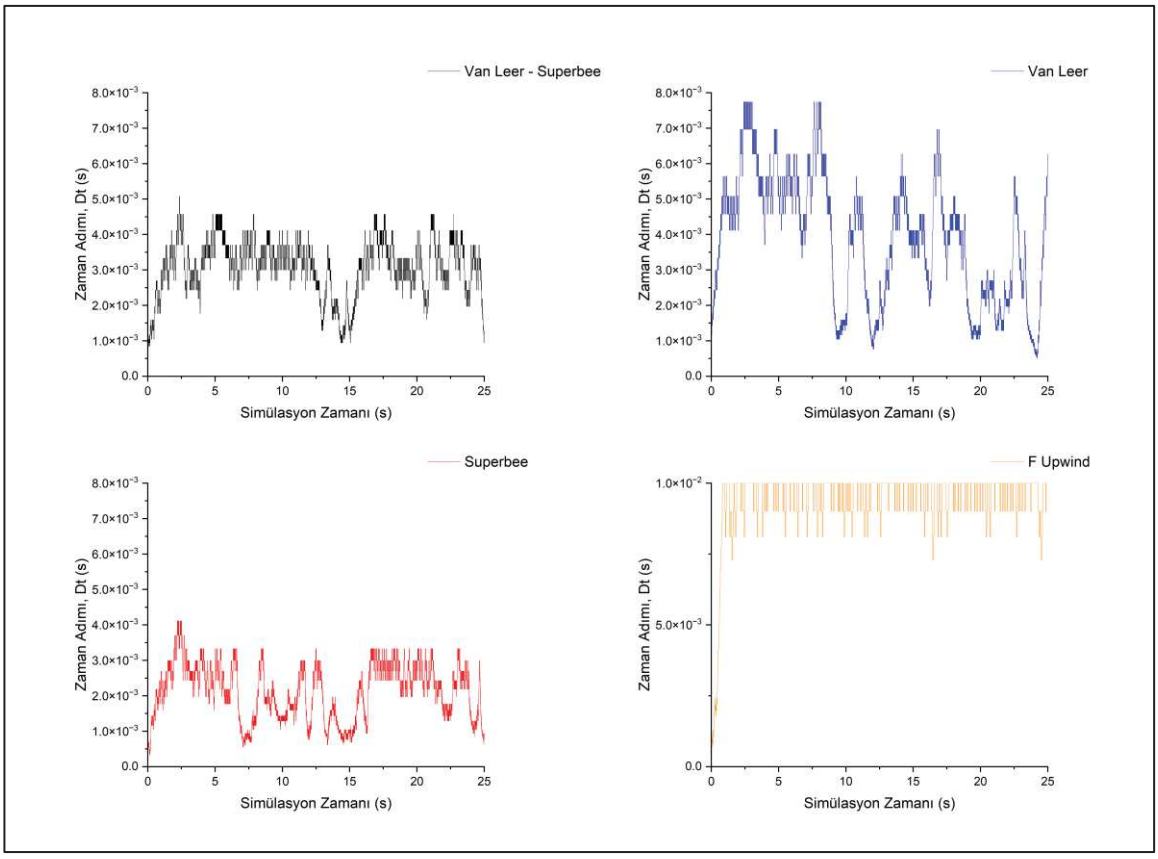
## 4.4. Ayrıklaştırma (Diskritizasyon) Şemalarının Maliyet (Çözüm Süresi) Etkisi

Bölüm 3.3.2'de bahsedildiği üzere ayrıklaştırma şemaları çözümün yakınlaşmasına ve kısmen de olsa sonuçlara etki edebilmektedir. Çözümün yakınsama veya ıraksama durumuna bağlı olarak HAD paket programları (mevcut tezde kullanılan MFiX de dahil) çeşitli algoritmalar aracılığıyla zaman adımı ayarlaması yapabilmektedir. Bu durum da doğru ayrıklaştırma şemalarının seçilmesinin elde edilen sonuçlar kadar, maliyet açısından da önemli olduğunu göstermektedir. Bu bölümde, mevcut çalışmada da kullanılmış olan Wang ve arkadaşlarının [12] önermiş olduğu çözüm süresini kısalttığını belirttikleri van Leer-Superbee kombinasyonu ayrıklaştırma şemalarının kullanımı ile yapılan çözümler; van Leer, Superbee ve daha düşük dereceli bir ayrıklaştırma şeması olan birinci dereceden upwind (FOU) şemalarının çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için yapılan dört farklı sayısal çözüm için kullanılan ayrıklaştırma şemaları Çizelge 4.13'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.13. Ayrıklaştırma şemaları karşılaştırması için yapılan çözümlerdeki ayrıklaştırma şemaları seçimi

| **Ayrıklaştırma Şeması** / **Parametreler** | **Van Leer - Superbee** | **Van Leer** | **Superbee** | **Birinci Derece Upwind (FOU)** |
|---|---|---|---|---|
| Gaz Basıncı | Van Leer | Van Leer | Superbee | FOU |
| Hacim Kesri | Superbee | Van Leer | Superbee | FOU |
| U-momentum | Van Leer | Van Leer | Superbee | FOU |
| V-momentum | Van Leer | Van Leer | Superbee | FOU |
| W-momentum | Superbee | Van Leer | Superbee | FOU |
| Enerji | Superbee | Van Leer | Superbee | FOU |
| Kütle Kesri | Van Leer | Van Leer | Superbee | FOU |
| Granüler Enerji | Superbee | Van Leer | Superbee | FOU |
| Scalar ve K-ε | Superbee | Van Leer | Superbee | FOU |
| DES Difüzyonu | Superbee | Van Leer | Superbee | FOU |

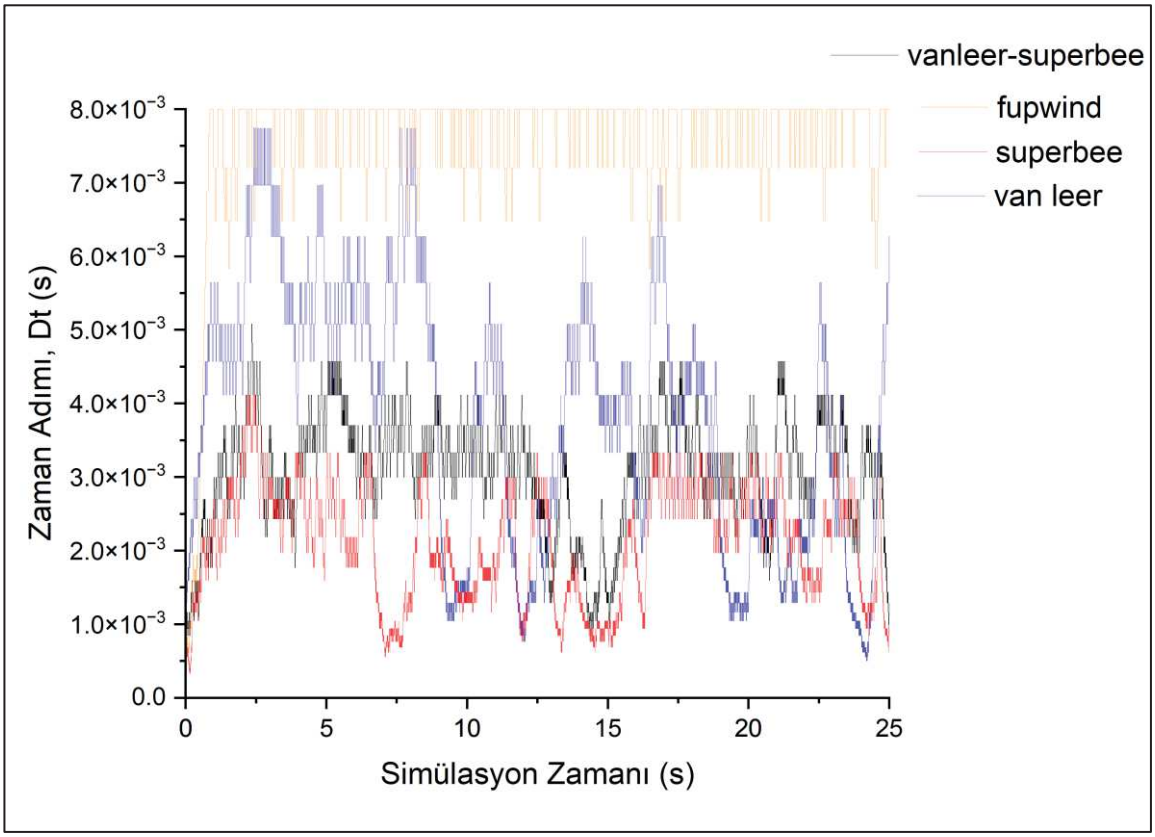
Çizelge 4.13'te verilen 4 farklı ayrıklaştırma şeması kullanılarak İyileştirme Önerisi II için kullanılan model tekrarlayarak MFiX-PIC ile çözülmüştür. Analiz için kullanılan hesaplayıcı, Xeon(R) Gold 6258R CPU @ 2.70GHz işlemciye sahip ve 28 çekirdek kullanılarak paralel olarak çözüm yapmıştır. Şekil 4.44'te her bir ayrıklaştırma şeması için yapılan çözümlerin simülasyon zamanına bağlı zaman adımları verilmiştir.




Şekil 4.44. Her bir ayrıklaştırma şeması için zamana bağlı çözüm zaman adımları

Şekil 4.45'te ise Şekil 4.44'te verilmiş olan dört farklı grafiğin karşılaştırması için tek bir grafikte birleştirilmiş hali verilmiştir. Grafiklerdeki zaman adımları değişikliklerinin ana sebepleri CFL kontrolü veya çözümde oluşan ıraksamalardır. Iraksama sonucu oluşan zaman kayıpları grafiklere direkt değer olarak yansımamıştır ancak zaman adımı azaltma sebeplerinin büyük çoğunlukla yakınsamamaktan kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Superbee ve van Leer şemaları ayrı ayrı incelendiğinde zaman adımının çözüm algoritması tarafından sık sık değiştirildiği gözlemlenmiştir. Ancak zaman adımı van Leer için en yüksek 8,0 x $10^{-3}$ s. seviyelerine yükselebilirken, Superbee şeması için bu değer 4,0 x $10^{-3}$ s. seviyesini geçememiştir. Kullanılan iki şema da literatürde kullanılan ve çeşitli akışkan yatak çözümleri için kabul edilebilir sonuçlar sunduğu onaylanmış yüksek dereceli boyutsal ayrıklaştırma şemalarıdır. Program çıktıları incelendiğinde 0-25 s. aralığında yapılan çözümlerde Superbee şemasının 556, van Leer şemasının 613, van Leer – Superbee hibrit şemanın ise 166 kez ıraksama sebebiyle zaman adımının küçüldüğü görülmüştür. Van Leer şemasının daha yüksek zaman adımlarına çıkabilmesi sebebiyle yakınsamama sayısının fazla olduğu gözlemlenmiştir ancak bu sonucun tüm çözüm boyunca ortalama zaman adımı ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği düşünülmüştür. FOU şemasında ise

zaman adımı değişikliklerinin ıraksama kaynaklı değil CFL kontrolü kaynaklı olduğu gözlemlenmiştir.




Şekil 4.45. Ayrıklaştırma şemaları çözümlerinin zaman adımları grafiklerinin toplu olarak karşılaştırılması

Dört farklı şema ile yapılan çözümlerin zaman adımlarında yakınsamama sayısı, ortalama simülasyon zaman adımı ve CPU kullanım süreleri açısından karşılaştırılması yapılmış ve Çizelge 4.14'te verilmiştir. FOU şeması birinci dereceden bir şema olduğu için ortalama zaman adımı ve CPU kullanım süreleri açısından yüksek dereceli ayrıklaştırma şemalarına kıyasla büyük farklılıklar göstermektedir. Ancak van Leer – Superbee şemasına kıyasla CPU kullanımı %18,04 daha az olmuştur. İterasyonlarda yakınsamama sorunu yaşamayan FOU şeması, %206,8 daha büyük ortalama simülasyon zaman adımı ile çözüm yapmıştır.

Yüksek dereceli boyutsal ayrıklaştırma şemaları incelendiğinde ise yakınsamama sayısı bakımından hibrit modele kıyasla Superbee %234,9, van Leer ise %269,3 daha fazla yakınsamama sorunu yaşamıştır. Ortalama zaman adımları incelendiğinde ise hibrit modele kıyasla Superbee %37,1 daha küçük adımlarla, van Leer ise %1,08 daha büyük adımlarla çözüm yapmıştır.

Sayısal analiz maliyeti için değerlendirilmesi gereken CPU kullanım süreleri karşılaştırıldığında ise hibrit modele kıyasla Superbee şeması %122,7, van Leer şeması için %26,63 daha uzun süre CPU kullanmıştır.

Çizelge 4.14. Kullanılan dört farklı şema için yakınsamama sayısı, ortalama zaman adımı ve CPU kullanım karşılaştırması

| **Boyutsal Ayrıklaştırma Şeması** | **Çözüm Boyunca Yakınsamama** | | **Ortalama Simülasyon Zaman Adımı** | | **Toplam CPU Gerçek Kullanım** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Sayısı** | **Göreceli Fark** | **Süre** | **Göreceli Fark** | **Süre** | **Göreceli Fark** |
| FOU | 0 | - | $8{,}53 \times 10^{-3}$ s | +%206,8 | 893,66 dk. (14,89 sa.) | -%18,04 |
| Superbee | 556 | +%234,9 | $1{,}75 \times 10^{-3}$ s | -%37,15 | 2428,58 dk. (40,48 sa.) | +%122,7 |
| Van Leer | 613 | +%269,3 | $2{,}81 \times 10^{-3}$ s | +%1,08 | 1380,6 dk. (23,01 sa.) | +%26,63 |
| Van Leer-Superbee | 166 | - | $2{,}78 \times 10^{-3}$ s | - | 1090,31 dk. (18,17 sa.) | - |

Maliyet açısından bakıldığında hibrit boyutsal ayrıklaştırma şema modeli, Superbee şemalarının kullanılmasına kıyasla %55,11, van Leer şemalarının kullanılmasına kıyasla %21,03 daha verimli olarak çözüme ulaşmıştır.

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, biyokütle yakıtlı 62 bar basınçta, 450 °C sıcaklıkta 50 t/h buhar üreten bir dolaşımlı akışkan yataklı buhar kazanı ısıl tasarımı yapılmış, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile hidrodinamik yapısı incelenerek uygulamada sorun olan bölgeler için tasarım önerileri yapılmaya çalışılmıştır. Akışkan yatakların modellenmesi endüstriyel ölçekte, özellikle gaz-katı ilişkisi incelenmesi gerektiğinde oldukça maliyetli olmaktadır. Bu sebeple yatak yapısını sayısal olarak çözerken maliyeti yükseltmeyecek yöntemler literatürde araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak buhar kazanının ısıl tasarımı, termodinamik denge yaklaşımı ile analitik olarak yapılarak gerekli yakma havası ve baca gazı debileri hesaplanmıştır. Kimyasal tepkimelerin de çözüldüğü HAD modelleri geometri ve çözüm düğüm sayıları arttıkça gerekli işlemci gücü veya zamanın çok arttığı modellerdir. Bu sebeple baca gazı kompozisyonları hesaplandıktan sonra elde edilen özkütle ve viskozite değerleri Adamczyk ve arkadaşlarının [50] çalışmalarında kullanmış olduğu psüdo-yanma modelinin gaz sınır şartları olarak kullanılmıştır. HAD katı modeli için ise iki akışkan modeli (TFM)'den daha ayrıntılı ancak ayrık eleman modeli (DEM) modelinden daha genel sonuçlar veren hücre içinde partikül (PIC) modeli uygulanmıştır. Literatürde MFiX paket programı ile PIC modeli için kullanılan nümerik değerler incelendiğinde farklı boyutsal ayrıklaştırma (diskritizasyon) şemalarının kullanıldığı belirlenmiştir. Bunların en yaygın olanları yüksek dereceden şemalar olan Superbee ve van Leer şemalarıdır. Literatürde bu şemaların hibrit kullanılmasının maliyete olumlu etkilerinin olduğunun belirtildiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu sebeple hibrit şekilde ayrıklaştırma şemaları kullanılmıştır.

Biyokütle kaynaklı katı yakıtların, fosil yakıtlardan ayrılan en önemli özelliklerinden biri nem ve uçucu karbon oranlarının yüksek olmasıdır. Biyokütlelerin bu özelliği ikincil ve gerektiği durumda üçüncül yakma havalarının kademelendirilmesinin, miktarının ve besleme şekillerinin tasarımının önemini artırmaktadır. Hücre sayısından ve istatistiksel ağırlıktan (PIC parametresi) bağımsızlık çalışmaları yapıldıktan sonra kabul edilen HAD sonuçları incelenmiştir. Gaz fazı ve katı fazı incelendiğinde hidrodinamik yapıyı, dolayısıyla kazan çalışma şartları ve verimi etkileyecek sorunlar tespit edilmiştir. Tespit edilen sorunlar için ikincil hava besleme nozullarının akış açılarında değişiklik yapılmıştır. Ayrıca sirkülasyonda belirlenen sorunlarla ilgili ayırıcı duvar geometrisi değişikliği yapılarak var olan/öngörülen sorunların giderilmesi için öneriler yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar kapsamında:

1) Termodinamik denge yaklaşımı ile yapılan hesaplama ile 850°C için baca gazı özkütlesi 0,3443 kg/m$^3$, viskozitesi 4,3450 * 10$^{-5}$ Pa.s olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin yakıt içeriğine göre değişmekle birlikte literatürdeki yakıtlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.
2) Ortalama 1,3 hücre sayısı artırma katsayısı kullanılarak, hücre sayısından bağımsızlık çalışması yürütülmüştür. Yapılan çalışmada katı yoğun bölge olan yatağın alt kısımlarında hücre büyüklüğünün çok küçük veya çok büyük olmasının sonucu diğerlerinden ayrıştırdığı gözlemlenmiştir. Basınç ve hız değerleri karşılaştırılarak yapılan çalışmada 30 saniye simülasyon süresinin ilk 5 saniyesi simülasyonun kararlı hale gelmesi için geçen süre olmuştur.
3) H= 1 m ve H= 10 m için incelenen ortalama gaz hızı ve basınç değerleri karşılaştırıldığında beş farklı hücre yapısından 804540 ile üçüncü sırada olan hücre yapısı, çözüm hücre sayısı olarak seçilmiştir.
4) Her bir istatistiksel parsel içindeki partikül miktarını belirleyen istatistiksel ağırlık değeri için yürütülen çalışmada literatürle uyumlu beş farklı istatistiksel ağırlık için sayısal çözüm yapılarak karşılaştırılmıştır. Üç farklı yükseklikteki katı hacim kesri ve katı kütlesi incelendiğinde, katı yoğun yüksekliklerde değerlerin daha fazla farklılaştığı gözlemlenmiştir. Her bir değer için çözümler ortalamaya yakın olması ve çözüm süresini de çok fazla etkilememesi sebebiyle ikinci küçük değer olan 25000 seçilmiştir.
5) İlk durum için ortalama gaz hızları $U_g$, H= 1 m için 6,12 m/s, H= 10 m için 6,52 m/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca ikincil hava nozullarının yatay doğrultuda hava girişi sağlaması sebebi ile vorteks oluşumu gözlemlenmiştir.
6) İlk durumda yatak içindeki ortalama gaz hızları 4 m/s – 8 m/s arasında değişmektedir. Ancak bazı noktalarda gaz hızının 10 m/s üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Duvar bölgelerinde oluşan yüksek gaz hızları, partikül hızlarında da artışa sebep olmuştur. Katı partiküllerin duvar yönlü hızları için belirlenen -2 m/s – 2 m/s hız aralığından daha hızlı partikül hızları belirlenmiştir. Bu hızlar su duvarlarına zarar vermektedir.
7) Gaz ve katı hızlarının yatay olarak yüksek olması, vorteks oluşumlarının gözlenmesinin partikül sirkülasyonunu olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır.

8) İlk durumda görülen problemin çözümü için ikincil hava besleme nozullarının yatay açıda besleme yapması yerine 20° açı ile aşağı (-y) yönlü besleme yapması önerilmiş ve sayısal çözümler yapılmıştır. Mevcut durum ve iyileştirme önerisi I incelendiğinde sabit yatağın akışkanlaşma sonucu 4 m – 4,5 m aralığına kadar genişlediği görülmektedir. Bu sebeple 3 m, 8 m ve dönüş bölgesi olarak adlandırılan bölgede bulunan ortalama partikül kütleleri hesaplanmıştır. Nozul açısal değişimi sebebi ile ortalama katı kütleleri H = 3 m için -%3,77, H = 8 m için +%202,69, dönüş bölgesi için +%247,017 değişim göstermiştir.

Sonuçlar incelendiğinde endüstriyel ölçekli modelleme çalışmalarında zaman ve maliyetin önemli olması sebebiyle PIC modelinin kullanılmasının gaz-katı hidrodinamiği için uygun olduğu görülmüştür. Tez çalışması kapsamında, endüstriyel ölçekli akışkan yatak çalışmalarında modelleme maliyetlerinin yüksek görülmesi sebebiyle yatak için sorunları ve çözümleri belirleyebilen uygun maliyetli yaklaşımlar kullanılmıştır. Psüdo-yanma yaklaşımı belirlenen sorunların modellenmesinde uygun olmuştur. Tez çalışmasının süresi ve çözüm için kullanılan hesaplayıcı bilgisayarın özellikleri dikkate alındığında psüdo-yanma simülasyonu ile yanma reaksiyon modelinin karşılaştırması yapılamamıştır.

Gelecek çalışmalar için şu önerilerde bulunulabilir:

1) İkincil hava nozul açıları için aşağı yönlü -20° uygun görülmüştür ancak farklı açılar da parametrik olarak kullanılarak, ikincil hava açılarının etkileri parametrik olarak incelenebilir.
2) Psüdo-yanma modeli, yatak içi sıcaklığın her noktada aynı olduğu yaklaşımına dayanmaktadır. Homojen ve heterojen reaksiyonlar tanımlanarak kimyasal reaksiyon kinetikleri ile birlikte yanma modeli oluşturulabilir. Elde edilen veriler karşılaştırılabilir.
3) Tez çalışmasında yatak içi sıcaklıklar sabit kabul edildiğinden duvar şartları adyabatik olarak tanımlanmıştır. Kimyasal reaksiyonların tanımlanmasıyla birlikte buhar kazanlarının yapısı gereği duvar şartlarını buharlaştırıcı ve kızdırıcı borulara uygun şekilde ısı akısı tanımlaması yapılarak çalışma daha kapsamlı hale getirilebilir.

# KAYNAKLAR


1. Billen, P., Costa, J., Van Der Aa, L., Van Caneghem, J., and Vandecasteele, C. (2015). Electricity from poultry manure: A cleaner alternative to direct land application. *Journal of Cleaner Production*, 96, 467–475.

2. Topal, H. (2018). Thermal Design of a Fluidized Bed Steam Boiler Using Refuse Derived Fuel ( RDF ) in Organic Rankine Cycle. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 5(4), 173–189.

3. Duan, F., Liu, J., Chyang, C. S., Hu, C. H., and Tso, J. (2013). Combustion behavior and pollutant emission characteristics of RDF (refuse derived fuel) and sawdust in a vortexing fluidized bed combustor. *Energy*, 57, 421–426.

4. Alexander, K. C., Belin, F., David, J. E., and Walker, D. J. (1994). *Circulating fluidized bed reactor with internal primary particle separation and return* (United States Patent No. US5343830A). United States Patent and Trademark Office.

5. Gómez, M. A., Porteiro, J., de la Cuesta, D., Patiño, D., and Míguez, J. L. (2016). Numerical simulation of the combustion process of a pellet-drop-feed boiler. *Fuel*, 184, 987–999.

6. Kong, D., Wang, S., Zhou, M., Luo, K., Hu, C., Li, D., and Fan, J. (2020). Three-dimensional full-loop numerical simulation of co-combustion of coal and refuse derived fuel in a pilot-scale circulating fluidized bed boiler. *Chemical Engineering Science*, 220, 115612.

7. Tarmizi, A., Nugroho, G., Syaifudi, A., and Sudarmanta, B. (2018). Numerical Study Effect of Secondary Air Mass Flow to Characteristics of Circulating Fluidized Bed Boiler. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 4(1), 136.

8. Syamlal, M., and O'Brien, T. J. (1988). Simulation of granular layer inversion in liquid fluidized beds. *International Journal of Multiphase Flow*, 14(4), 473–481.

9. Debnath, S., Nath, H., and Chauhan, V. (2021). CFD modeling of a typical fluidized bed column. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6178-6184.

10. Xie, J., Zhong, W., Jin, B., Shao, Y., and Huang, Y. (2013). Eulerian-Lagrangian method for three-dimensional simulation of fluidized bed coal gasification. *Advanced Powder Technology*, 24(1), 382–392.

11. Song, T., Wu, J., Shen, L., and Xiao, J. (2012). Experimental investigation on hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds. *Biomass and Bioenergy*, 36, 258-267.

12. Wang, S., Luo, K., and Fan, J. (2020). CFD-DEM coupled with thermochemical sub-models for biomass gasification: Validation and sensitivity analysis. *Chemical Engineering Science*, 217, 115550.

13. Li, P., Zou, C., Dong, F., Shi, Z., and Ma, Z. (2020). CFD Modelling Based on MP-PIC of Low Rank Pulverized Coal Pyrolysis in Pyrolysis Furnace. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 474(5), 052027.

14. Xie, J., Zhong, W., and Yu, A. (2018). MP-PIC modeling of CFB risers with homogeneous and heterogeneous drag models. *Advanced Powder Technology*, 29(11), 2859–2871.

15. Gu, J., Shao, Y., and Zhong, W. (2020). 3D simulation on pressurized oxy-fuel combustion of coal in fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 31(7), 2792–2805.

16. Cui, Y., Zhong, W., Xiang, J., and Liu, G. (2019). Simulation oncoal-fired supercritical CO 2 circulating fluidized bed boiler: Coupled combustion with heat transfer. *Advanced Powder Technology*, 30(12), 3028-3039.

17. Zhou, W., Zhao, C. S., Duan, L. B., Qu, C. R., and Chen, X. P. (2011). Two-dimensional computational fluid dynamics simulation of coal combustion in a circulating fluidized bed combustor. *Chemical Engineering Journal*, 166(1), 306–314.

18. Gu, J., Zhong, W., and Yu, A. (2019). Three-dimensional simulation of oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed. *Powder Technology*, 351, 16–27.

19. Jia, C., Li, J., Chen, J., Cui, S., Liu, H., and Wang, Q. (2020). Simulation and prediction of co-combustion of oil shale retorting solid waste and cornstalk in circulating fluidized bed using CPFD method. *Applied Thermal Engineering*, 165(March 2019), 113574.

20. El-Sayed, S. A., and Noseir, E. H. (2019). Simulation of combustion of sesame and broad bean stalks in the freeboard zone inside a pilot-scale bubbling fluidized bed combustor using CFD modeling. *Applied Thermal Engineering*, 158, 113767.

21. El-Sayed, S. A., and Noseir, E. H. (2019). Experimental Investigation of Combustion Characteristics and Emissions for a Pilot-Scale Bubbling Fluidized Bed Combustor Fueled by Biomass Chips of Sesame and Broad Bean Stalks. *Combustion Science and Technology*, 191(12), 2243–2270.

22. Solnordal, C. B., Kenche, V., Hadley, T. D., Feng, Y., Witt, P. J., and Lim, K. S. (2015). Simulation of an internally circulating fluidized bed using a multiphase particle-in-cell method. *Powder Technology*, 274, 123–134.

23. Srirangan, K., Akawi, L., Moo-Young, M., and Chou, C. P. (2012). Towards sustainable production of clean energy carriers from biomass resources. *Applied Energy*, 100, 172–186.

24. Zhang, L., Xu, C., and Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969-982.

25. Vassilev, S. V, Baxter, D., Andersen, L. K., and Vassileva, C. G. (2009). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913–933.

26. Schipfer, F., and Kranzl, L. (2019). Techno-economic evaluation of biomass-to-end-use chains based on densified bioenergy carriers (dBECs). *Applied Energy*, 239(February), 715–724.

27. Jenkins, B. M., Baxter, L. L., and Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology,* 54, 17-46.

28. Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Energy and Combustion Science*, 31(2), 171–192.

29. Chen, T., Ku, X., Lin, J., and Jin, H. (2019). Modelling the combustion of thermally thick biomass particles. *Powder Technology*, 353, 110–124.

30. Basu, P., Kefa, C., and Jestin, L. (2000). *Boilers and Burners*. New York: Springer, 1-552.

31. Kunii, D., and Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*. (2). Oxford: Butterworth-Heinemann, 1-491.

32. Yang, W. (2003). *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems.* (1). Boca Raton: CRC Press, 1-1868.

33. Haider, A., and Levenspiel, O. (1989). Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder Technology*, 58(1), 63–70.

34. Grace, J. R. (1986). Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and other two-phase suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64(3), 353–363.

35. Bi, H. T., and Grace, J. R. (1995). Flow regime diagrams for gas-solid fluidization and upward transport. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(6), 1229–1236.

36. Garg, R., Galvin, J., Li, T., and Pannala, S. (2012). Open-source MFIX-DEM software for gas-solids flows: Part I-Verification studies. *Powder Technology*, 220, 122–137.

37. Alobaid, F., Ströhle, J., and Epple, B. (2013). Extended CFD/DEM model for the simulation of circulating fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 24(1), 403–415.

38. Chu, K., Chen, J., and Yu, A. (2016). Applicability of a coarse-grained CFD–DEM model on dense medium cyclone. *Minerals Engineering*, 90, 43–54.

39. Stroh, A., Daikeler, A., Nikku, M., May, J., Alobaid, F., von Bohnstein, M., Ströhle, J., and Epple, B. (2019). Coarse grain 3D CFD-DEM simulation and validation with capacitance probe measurements in a circulating fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 196, 37–53.

40. Clarke, M., and Musser, J. (2020). The MFiX Particle-in-Cell Method ( MFiX- PIC ) Theory Guide; DOE.NETL-2020.2115. *NETL Technical Report Series*, Morgantown, 1-28.

41. Snider, D. M. (2001). An Incompressible Three-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows. *Journal of Computational Physics*, 170(2), 523–549.

42. Snider, D. M., Clark, S. M., and O'rourke, P. J. (2011). Eulerian-Lagrangian method for three-dimensional thermal reacting flow with application to coal gasifiers. *Chemical Engineering Science*, 66(6), 1285–1295.

43. O'Rourke, P. J., Zhao, P. (Pinghua), and Snider, D. (2009). A model for collisional exchange in gas/liquid/solid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 64(8), 1784–1797.

44. O'Rourke, P. J. and Snider, D. M. (2010). An improved collision damping time for MP-PIC calculations of dense particle flows with applications to polydisperse sedimenting beds and colliding particle jets. *Chemical Engineering Science*, 65, 6014-6028.

45. Kadyrov, T., Li, F., and Wang, W. (2019). Impacts of solid stress model on MP-PIC simulation of a CFB riser with EMMS drag. *Powder Technology*, 354, 517–528.

46. Baysal, Ö. (2007). *Akışkan Yatak İçerisindeki Gaz-Katı İki Fazlı Akışın Hidrodinamiğinin Sayısal Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

47. Syamlal, M. (1997). *Higher order discretization methods for the numerical simulation of fluidized beds*. Fluidization and Fluid-Particle Systems Topical Conference, Los Angeles, 1-7.

48. Syamlal, M. (1998). MFIX Documentation Numerical Technique; *DOE/MC31346-5824, NTIS/DE98002029, National Energy Technology Laboratory, Department of Energy*, 5824(January), DE-AC21-95MC31346.

49. Leonard, B. P., and Mokhtari, S. (1990). Beyond first-order upwinding: The ultra-sharp alternative for non-oscillatory steady-state simulation of convection. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30(4), 729-766.

50. Adamczyk, W. P., Węcel, G., Klajny, M., Kozołub, P., Klimanek, A., and Białecki, R. A. (2014). Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler-Lagrange approach. *Particuology*, 16, 29–40.

51. Altınsoy, Y., Keçeci, A., and Topal, H. (2021). Determination of the Bed Hydrodynamics by MFIX-PIC in the Biomass Gasification Process of Circulating Fluidized Bed. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(4), 552–569.

52. Li, T., Dietiker, J. F., and Shahnam, M. (2012). MFIX simulation of NETL/PSRI challenge problem of circulating fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 84, 746–760.

53. Li, T., Gel, A., Pannala, S., Shahnam, M., and Syamlal, M. (2014). CFD simulations of circulating fluidized bed risers, part I: Grid study. *Powder Technology*, 254, 170–180.

54. Li, T., Benyahia, S., Dietiker, J. F., Musser, J., and Sun, X. (2015). A 2.5D computational method to simulate cylindrical fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 123, 236–246.

55. Lungu, M., Siame, J., and Mukosha, L. (2020). Comparison of CFD-DEM and TFM approaches for the simulation of the small scale challenge problem 1. *Powder Technology*, 378(A), 85-103.

56. Clarke, L. E. (2018). *Interfacing the Cfd Code Mfix With the Petsc Linear Solver Library To Achieve Reduced Computation Times*. Yüksek Lisans Tezi, University of North Dakota Chemical Engineering, North Dakota, 1-91.

57. Gu, J., Liu, Q., Zhong, W., and Yu, A. (2020). Study on scale-up characteristics of oxy-fuel combustion in circulating fluidized bed boiler by 3D CFD simulation. *Advanced Powder Technology*, 31(5), 2136–2151.

58. Capecelatro, J., and Desjardins, O. (2013). An Euler-Lagrange strategy for simulating particle-laden flows. *Journal of Computational Physics*, 238, 1–31.

59. Kotteda, V. M. K. K., Kumar, V., and Spotz, W. (2018). Performance of preconditioned iterative solvers in MFiX–Trilinos for fluidized beds. *Journal of Supercomputing*, 74(8), 4104–4126.

60. Gu, J., Shao, Y., and Zhong, W. (2020). Study on oxy-fuel combustion behaviors in a S-CO2 CFB by 3D CFD simulation. *Chemical Engineering Science*, 211, 115262.

61. Yan, J., Lu, X., Xue, R., Lu, J., Zheng, Y., Zhang, Y., and Liu, Z. (2020). Validation and application of CPFD model in simulating gas-solid flow and combustion of a supercritical CFB boiler with improved inlet boundary conditions. *Fuel Processing Technology*, 208(February), 106512.

62. Rhodes, M. J., Sollaart, M., and Wang, X. S. (1998). Flow structure in a fast fluid bed. *Powder Technology*, 99(2), 194–200.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*