

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PETROL RAFİNELERİNDEKİ YANGINLARIN CFD İLE  
MODELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet ABDULLAH**

**Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı**

**EYLÜL 2023**



**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PETROL RAFİNELERİNDEKİ YANGINLARIN CFD İLE  
MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet ABDULLAH**

**Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gökhan COŞKUN**

**EYLÜL 2023**



Ahmet ABDULLAH tarafından hazırlanan “Petrol Rafinelerindeki Yangınların CFD İle Modellenmesi” adlı tez çalışması 26.09.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :** **Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Doç. Dr. Gökhan COŞKUN(Danışman)** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Doç. Dr. Üsame DEMİR** .....  
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “PETROL RAFİNELERİNDEKİ YANGINLARIN CFD İLE MODELLENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, etik kurul onay belgesi aldığımı, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(26/09/2023).

(imza)

Ahmet ABDULLAH





## TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, bu çalışmayı tamamlamamı nasip ederek onurlandıran Yüce Rabbim'e Hamd olsun.

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Gökhan COŞKUN'a teşekkür ve saygılarımı en kalbi duygularıyla sunar, çalışma boyunca manevi desteğini eksik etmeyen annem, babam, eşim, kardeşlerim ve yakın arkadaşlarım'a göstermiş oldukları sabırdan dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, üniversitede tanıdığım bütün Akademik Kadrosuna dahi bana her türlü desteği sunan bilgisinden yararlandığım, her türlü katkıda bulunan herkese teşekkür eder saygı ve hürmetimi sunarım

Ahmet ABDULLAH



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....                           | v         |
| TEŞEKKÜR .....                                                              | vii       |
| İÇİNDEKİLER .....                                                           | ix        |
| KISALTMALAR .....                                                           | xi        |
| SİMGELER .....                                                              | xiii      |
| TABLO LİSTESİ .....                                                         | xv        |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                         | xvii      |
| ÖZET .....                                                                  | xix       |
| SUMMARY .....                                                               | xxi       |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                       | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivasyon .....                                                       | 2         |
| 1.2. Hedefler .....                                                         | 2         |
| 1.3. HAD Teknolojisine ve Gelişimine Genel Bakış .....                      | 3         |
| 1.4. Petrol Yangınları Alanında HAD Simülasyonu .....                       | 4         |
| <b>2. SİMÜLASYON AMAÇLARI VE HEDEFLERİ .....</b>                            | <b>5</b>  |
| 2.1. Tezin Anahatları .....                                                 | 6         |
| 2.2. Kapsam .....                                                           | 6         |
| <b>3. HİDROKARBON DEPOLAMA TANKI TASARIM STANDARTLARI .....</b>             | <b>9</b>  |
| 3.1. Üstü Açık, Yüzer Tavanlı Tank .....                                    | 10        |
| 3.2 Dahili, Yüzer Tavanlı Tank .....                                        | 11        |
| 3.3. Sabit Tavanlı Tanklar .....                                            | 11        |
| 3.4. Tutuşma Kaynakları .....                                               | 12        |
| 3.4.1. Elektrik kıvılcımları .....                                          | 12        |
| 3.4.2. Yanıcı gaz sızıntıları .....                                         | 12        |
| 3.4.3. Yanıcı sıvı sızıntıları .....                                        | 12        |
| 3.4.4. İnsan hataları .....                                                 | 12        |
| 3.4.5. Radyasyon ısıya maruz kalma .....                                    | 12        |
| 3.4.6. Yıldırım çarpması .....                                              | 13        |
| 3.4.7. Kendiliğinden ignisyon .....                                         | 13        |
| 3.4.8. Sızıntılar .....                                                     | 13        |
| 3.4.9. Statik elektrik .....                                                | 13        |
| 3.4.10. Açık alev .....                                                     | 13        |
| 3.4.11. Aşırı ısıtma .....                                                  | 13        |
| 3.5. Tankların Konumu ve Düzeni .....                                       | 13        |
| 3.6. Atmosferik Depolama Tankı Yangın Vakaları .....                        | 14        |
| 3.6.1. Tek tank vakaları .....                                              | 15        |
| 3.6.2. Çoklu tank olayları .....                                            | 16        |
| <b>4. ATMOSFERİK DEPOLAMA TANKLARI ÜZERİNDE RADYANT ISININ ETKİSİ .....</b> | <b>17</b> |
| 4.1. Atmosferik Depolama Tanklarının Yangından Korunması .....              | 18        |
| 4.1.1. Su soğutma sistemleri .....                                          | 19        |

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.2. Su sprej ve dökme sistemleri.....                            | 20        |
| 4.1.3. Sabit ve römorklu su monitörleri .....                       | 20        |
| 4.1.4. Köpük sistemleri .....                                       | 21        |
| 4.1.5. Taban enjeksiyon sistemleri .....                            | 21        |
| 4.1.6. Üst köpük dökme sistemleri .....                             | 22        |
| 4.1.7. Köpük monitörleri .....                                      | 22        |
| <b>5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) MODELLERİ .....</b>     | <b>25</b> |
| 5.1. Amaçlar .....                                                  | 28        |
| 5.2. Tank Yangını Deneysel Çalışması .....                          | 29        |
| 5.2.1. Tank yangın senaryosu.....                                   | 30        |
| 5.2.2. Sayısal simülasyon .....                                     | 31        |
| 5.2.2.1. Yangın dinamiği simülatörü.....                            | 31        |
| 5.2.2.2. Hidrodinamik modeli .....                                  | 32        |
| 5.2.2.3. Yanma modeli .....                                         | 33        |
| 5.2.2.4. Radyasyon taşıma modeli.....                               | 33        |
| 5.2.3. Tank yangını modellenmesi .....                              | 34        |
| 5.2.3.1. Model girdileri.....                                       | 34        |
| 5.2.3.2. Atmosferik koşulların tanımlanması .....                   | 36        |
| 5.2.3.3. Radyometreler ve ölçüm noktaları .....                     | 36        |
| 5.2.3.4. Mesh çalışması .....                                       | 37        |
| 5.2.3.5. FDS tank yangın simülasyonu.....                           | 38        |
| 5.2.3.6. Model çıktıları .....                                      | 38        |
| 5.2.3.7. Farklı mesh boyutlarıyla yayma gücü ölçümü .....           | 44        |
| 5.3. Model Çıktıları ile Deneysel Verilerin Karşılaştırılması ..... | 44        |
| <b>6. SONUÇ .....</b>                                               | <b>47</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                               | <b>49</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                               | <b>53</b> |

## **KISALTMALAR**

|            |                                   |
|------------|-----------------------------------|
| <b>CFD</b> | : Computational fluid dynamics    |
| <b>HAD</b> | : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği |
| <b>RTD</b> | : Radyasyon taşıma denklemi       |
| <b>SHY</b> | : Sonlu Hacim Yöntemi             |





## SİMGELER

|                           |                                                                        |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>C<sub>p</sub></b>      | : Özgöl ısı, kJ/kg K                                                   |
| <b>D</b>                  | : Yangın çapı, m                                                       |
| <b>d<sub>x</sub></b>      | : Nominal mesh boyutu                                                  |
| <b>g</b>                  | : Yerçekimi ivmesi, m/s <sup>2</sup>                                   |
| <b>h</b>                  | : Entalpi, W/m <sup>2</sup> K                                          |
| <b>I</b>                  | : Bir katı açi birimi başına radyasyon yoğunluğu, W/kare radyan        |
| <b>I<sub>b</sub></b>      | : Katı açi birimi başına radyasyon kara cisim yoğunluğu, W/kare radyan |
| <b>k</b>                  | : Soğurma katsayısı, 1/m                                               |
| <b>M</b>                  | : Gaz karışımının moleküler ağırlığı, kg/mol                           |
| <b>M<sub>F</sub></b>      | : Yakıt türlerinin moleküler ağırlığı, kg/mol                          |
| <b>M<sub>O</sub></b>      | : Oksijen türlerinin moleküler ağırlığı, kg/mol                        |
| <b>m<sub>i</sub>'''</b>   | : i türün birim hacim başına üretim oranı, kg/m <sup>3</sup>           |
| <b>P</b>                  | : Basınç, Pa                                                           |
| <b>Q</b>                  | : Isı Yayılım Oranı, kW                                                |
| <b>Ra</b>                 | : Radyant ısı akısı, W/m <sup>2</sup>                                  |
| <b>.Ra<sub>r</sub>'''</b> | : Birim hacim başına radyant ısı yayma oranı, W/m <sup>3</sup>         |
| <b>.Ra<sub>r</sub>''</b>  | : Katı bir yüzeye radyant akısı, W/m                                   |
| <b>R</b>                  | : Grid çözünürlüğü                                                     |
| <b>RH</b>                 | : Bağıl nem, %                                                         |
| <b>Ru</b>                 | : Evrensel gaz sabiti, J/kg K                                          |
| <b>S</b>                  | : Radyasyon yoğunluğu yönünde birim vektör                             |
| <b>T</b>                  | : Sıcaklık, K                                                          |
| <b>t</b>                  | : Zaman, sn                                                            |
| <b>U</b>                  | : Entegre ışıma yoğunluğu, W/radyant kare                              |
| <b>U<sub>0</sub></b>      | : Yükseklikte referans rüzgar hızı, m/s                                |
| <b>U<sub>∞</sub></b>      | : Rüzgar hızı, m/s                                                     |
| <b>V<sub>0</sub></b>      | : = Stokiyometrik katsayı, oksijen türleri                             |
| <b>V<sub>F</sub></b>      | : Stokiyometrik katsayı, yakıt türleri                                 |
| <b>xx</b>                 | : = (x,y,z) konum vektörü                                              |
| <b>Y<sub>i</sub></b>      | : İ. Türlerinin kütle fraksiyonu                                       |

|              |                                                   |
|--------------|---------------------------------------------------|
| $Y_F$        | : Yakıt türlerinin kütle fraksiyonu               |
| $Y_O$        | : Oksijen türlerinin kütle fraksiyonu             |
| $Y_0^\infty$ | : Ortamdaki oksijenin kütle fraksiyonu            |
| $Y_F^I$      | : Yakıt akısındaki yakıtın kütle fraksiyonu       |
| $Z$          | : Karışım fraksiyonu                              |
| $z_0$        | : Rüzgarın ölçüldüğü yerden referans yükseklik, m |
| $z_p$        | : Atmosferik profil yüksekliği, m                 |
| $l$          | : Atmosferik profil üssü                          |
| $\Phi$       | : Dağıtma işlevi                                  |
| $\rho$       | : Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )                   |
| $r_{ij}$     | : Viskoz gerilim tensörü                          |
| $\infty$     | : Ortam koşulu                                    |
| $x,y,z$      | : Konum dizinleri                                 |
| $r$          | : Radyasyon fraksiyonu                            |



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 5.1.</b> Benzin girdileri.....                                        | 35 |
| <b>Tablo 5.2.</b> Katı yapıların fiziksel ve termal özellikleri.....           | 36 |
| <b>Tablo 5.3.</b> Havuz Yangını Üzerinde Yapılan Alevin Isı Akısı Deneyi ..... | 30 |
| <b>Tablo 5.4.</b> Model Girdileri .....                                        | 35 |
| <b>Tablo 5.5.</b> Alan Boyutları.....                                          | 38 |





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Yüksek derecede uçucu petrol ürünlerinin depolanmasında yaygın olarak kullanılan üstü açık, yüzer tavanlı tanklara örnek.....                                                                                                                      | 10 |
| Şekil 3.2. Dahili, yüzer tavanlı bir tankın tipik örneği (hem sabit tavanlı hem de yüzer tavanlı tankları gösteriyor) .....                                                                                                                                   | 11 |
| Şekil 3.3. Tipik sabit tavanlı tank: sabit tavan koni veya kubbe şeklinde olabilir.....                                                                                                                                                                       | 12 |
| Şekil 4.1. Yangınla mücadele köpük bazlı enjeksiyon sistemi. Köpük, tankın tabanına enjekte edilir ve daha sonra yükselerek sıvının yüzeyini kaplar.....                                                                                                      | 21 |
| Şekil 4.2. Yangın söndürme köpüğü üstten dökme sistemi .....                                                                                                                                                                                                  | 22 |
| Şekil 4.3. Yanan tanktan uzağa yerleştirilebilen römorka monte köpük monitörü ...                                                                                                                                                                             | 23 |
| Şekil 5.1. Bazı Deneylerin Sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                     | 30 |
| Şekil 5.2. L/D=5m'de yangın kaynağından radyometre mesafesi .....                                                                                                                                                                                             | 37 |
| Şekil 5.3. 4 metre çaplı bir tank için radyant ısı akısını ölçmek için radyometrenin 20 metre mesafeden yerleştirildiği ve aynı zamanda yayma gücünü ölçmek için radyometrenin yangının yüzeyine yerleştirildiği, FDS simülatöründen alınan bir görüntü ..... | 37 |
| Şekil 5.4. Birinci deneyin (1,5 m) Radyant Isı Akısı sonuçları .....                                                                                                                                                                                          | 39 |
| Şekil 5.5. Birinci deneyin (1,5 m) Yayma Gücü sonuçları.....                                                                                                                                                                                                  | 39 |
| Şekil 5.6. 1,5 m çaplı tank için FDS simülasyonunda tahmin edilen benzin alevi şeklini gösteren görüntü- .....                                                                                                                                                | 40 |
| Şekil 5.7. İkinci deneyin (3 m) Radyant Isı Akısı sonuçları .....                                                                                                                                                                                             | 41 |
| Şekil 5.8. 3 m çaplı tank için FDS simülasyonunda tahmin edilen benzin alevi şeklini gösteren görüntü.....                                                                                                                                                    | 42 |
| Şekil 5.9. Üçüncü deneyin (4 m) Radyant Isı Akısı sonuçları.....                                                                                                                                                                                              | 42 |
| Şekil 5.10. Üçüncü deneyin (4 m) Yayma Gücü sonuçları .....                                                                                                                                                                                                   | 43 |
| Şekil 5.11. 4 m çaplı tank için FDS simülasyonunda tahmin edilen benzin alevi şeklini gösteren görüntü.....                                                                                                                                                   | 43 |
| Şekil 5.12. Farklı mesh boyutlarıyla yayma gücünün sonuçlarını göstermektedir....                                                                                                                                                                             | 44 |
| Şekil 5.13. Üç tankın radyant ısı akısına ilişkin, FDS sonuçları ile deneysel verilerinin sonuçları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. ....                                                                                                           | 45 |
| Şekil 5.14. Üç tankın yayma gücüne ilişkin, FDS sonuçları ile deneysel verilerinin sonuçları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. ....                                                                                                                  | 45 |



## PETROL RAFİNELERİNDEKİ YANGINLARIN CFD İLE MODELLENMESİ

### ÖZET

Petrol tesislerinde yangınları modellemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Katı alev modeli, tek nokta kaynak modeli ve HAD modeli. Katı alev modeli ve tek nokta kaynak modeli, petrol tanklarındaki yangınları modellemek için yaygın olarak kullanılan iki yöntemdir.

Katı alev modeli, tank içindeki yangının, iyi tanımlanmış şekli ve boyutu olan katı bir alev olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu model, yangını katı bir nesne olarak ele alır ve alev yüksekliği, şekli ve sıcaklık dağılımı gibi faktörleri dikkate alır.

Tek nokta kaynak modeli ise, yangının ısı ve yanma ürünleri salan tek nokta kaynakla temsil edilebileceğini varsayar. Bu model, yalnızca ısı yayma oranını ve ışımsal ısı akısı dağılımını dikkate alarak yangın davranışını basitleştirir.

Hem katı alev modeli hem de tek nokta kaynak modelinin güçlü yanları ve sınırlamaları vardır. Modelleme yönteminin seçimi, çalışmanın özel amaçlarına, mevcut verilere ve istenen doğruluk düzeyine bağlıdır. Güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini sağlamak için seçilen modeli deneysel verilere veya gerçek hayattaki yangın olaylarına karşı doğrulamak önemlidir.

Petrol depolama tankları için HAD'de (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) bir yangını modellemek, yangın güvenliğini değerlendirmede ve etkili yangından korunma önlemleri tasarlamada önemli bir araçtır. Bu çalışma, petrol depolama tanklarındaki yangınların davranışını anlamak ve çevredeki ortam üzerindeki termal etkileri tahmin etmek için HAD simülasyonlarını kullanmaya odaklanmaktadır.

Araştırma, depolama tanklarının geometrisini ve fiziksel özelliklerini doğru bir şekilde temsil eden kapsamlı bir HAD modeli oluşturarak başlar. Model, tank boyutları, malzeme özellikleri, yakıt özellikleri ve atmosferik koşullar gibi faktörleri içerir. Yangın kaynağı, yakıt-hava karışımı, tutuşma ve alev yayılımı dikkate alınarak uygun yanma modelleri kullanılarak simüle edilir.

HAD simülasyonları aracılığıyla, alev şekli, sıcaklık dağılımı, ısı akısı ve duman üretimi dahil olmak üzere yangın davranışının çeşitli yönleri araştırılabilir. Simülasyon sonuçları, kütle yanma oranı için iki farklı değerle değerlendirildi. SFPA referans değeri olan  $0.055 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ile karşılaştırıldığında, 1.5, 3 ve 4 metre çapına sahip tanklar için sırasıyla 1.3, 1.28 ve  $0.6 \text{ kW/m}^2$  radiant ısı akısı elde edildi. Bu koşullar altında yayma gücü, sırasıyla 50.03, 67.95 ve  $81.67 \text{ kW/m}^2$  olarak hesaplandı. Aynı simülasyonlar, daha yüksek bir kütle yanma oranı olan  $0.083 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  değeri ile de değerlendirildi. Sonuçlar, 1.5, 3 ve 4 metre çapına sahip tanklar için sırasıyla 1.84, 1.72 ve  $0.7 \text{ kW/m}^2$  radiant ısı akısı elde edildiğini gösterdi. Bu koşullar altında yayma gücü, sırasıyla 56.37, 73.8 ve  $84.12 \text{ kW/m}^2$  olarak hesaplandı.

Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, petrol depolama tanklarındaki yangınlarla ilgili potansiyel tehlikeler ve riskler hakkında değerli bilgiler sağlar. Bu bilgi, yeterli

havalandırma, yangın söndürme sistemleri ve acil durum müdahale planları gibi yangın önleme ve azaltma stratejilerinin tasarımına rehberlik edebilir.

Ek olarak, HAD simülasyonları, değişen yangın boyutları, tank konfigürasyonları ve yangın söndürme stratejileri gibi farklı senaryoların değerlendirilmesine olanak tanır. Sonuçları karşılaştırarak ve analiz ederek, petrol depolama tesislerinin güvenliğini artırmak için en uygun tasarım seçimleri yapılabilir.

HAD modelinin doğruluğu ve güvenilirliği, simülasyon sonuçlarının mevcut deneysel veriler ve gerçek hayattaki yangın olayları ile karşılaştırılmasıyla doğrulanır. Herhangi bir tutarsızlık dikkatli bir şekilde analiz edilir ve yangın davranışını tahmin etmedeki doğruluğunu sağlamak için modelde iyileştirmeler yapılır.

Sonuç olarak, benzin depolama tankları için HAD'de bir yangının modellenmesi, yangın güvenliği analizi ve tasarım optimizasyonu için güçlü bir araç sağlar. Yangın davranışını doğru bir şekilde simüle ederek, potansiyel riskler belirlenebilir ve petrol depolama tesislerinde yangınların etkisini en aza indirmek için etkili yangından korunma önlemleri uygulanabilir.



## CFD MODELING OF FIRES IN OIL REFINES

### SUMMARY

A simulation was carried out to predict the possibility of a liquid hydrocarbon storage tank fire, its subsequent heat transfer to adjacent tanks through thermal radiation, and the response of the contents of the adjacent tank to this radiation. To predict whether an adjacent tank will ignite and when, it is crucial to quantify the radiant heat received by the adjacent tank from the fire.

In tank farm scenarios, fires occurring in large-scale storage tanks exhibit two prominent characteristics. Firstly, extinguishing these large-scale tank fires poses significant challenges, often resulting in substantial material losses. Secondly, these fires can trigger domino effects due to the propagation of thermal radiation, leading to a chain reaction of incidents. Given that pool fires are common accidents in the process industry and consistently trigger domino effects, it becomes essential to model and simulate the risks associated with pool fires in order to accurately predict their behavior.

Extensive research has been conducted on domino effects, exploring various aspects of their occurrence. Analyses of these effects in different industrial installations have revealed that the majority of domino accidents within process industries occur in atmospheric and cryogenic storage tanks. Furthermore, historical accident scenarios have highlighted fire as the predominant initiator for more than half of industrial domino incidents, with pool fires accounting for 44% of these fire-triggered accidents.

A domino effect is characterized by an initial event originating in a specific item or unit, which then sets off a sequence of subsequent events in nearby items or units. These subsequent events are triggered by escalation vectors such as blast waves and heat loads. In the context of a pool fire, the primary escalation vector is the heat load, resulting from the combination of heat transferred through convection and radiation. For tank fires, the contribution of radiation to the total heat load ranges from 92% to 100%, while convection's contribution is between 0% and 8%. Consequently, in open pool fires and tank fires, radiation heat flux emerges as the principal driver of escalation.

A range of mathematical models are available in the literature to calculate the radiant heat flux to a specified target, with each model being based on assumptions about the fire. Extensive literature discusses both experimental and theoretical investigations concerning thermal radiation emitted from flames. However, the majority of these studies have primarily centered around small-scale pool fires, which exhibit notable differences when compared to larger turbulent fires. Nonetheless, accurately predicting the radiative properties of these substantial flames remains challenging due to uncertainties associated with certain parameters unique to large turbulent diffusion flames. In the case of substantial hydrocarbon pool fires, substantial volumes of smoke are generated, enveloping the fire and leading to a reduction in thermal radiation. This phenomenon is commonly referred to as the "smoke blockage effect." Currently,

calculations and guidelines for determining safe distances between fires and structures adopt highly cautious approaches due to the lack of a dependable methodology for factoring in the smoke blockage effect. Furthermore, the significant impact of soot on the radiation emitted by hydrocarbon fires is widely acknowledged.

Regarding oil fires, several methods are available for modeling fires in oil reservoirs, including the solid flame model, the single point source model, and the CFD model. The solid flame model and the single point source model are two commonly used methods for modeling fires in oil tanks.

The solid flame model operates under the premise that the fire inside the tank assumes the form of a solid flame, characterized by well-defined dimensions and shape. This approach treats the fire as a cohesive entity, taking into consideration variables such as flame height, shape, and temperature distribution. Despite its consideration of the wind's impact, the solid flame model is subject to limitations.

Primarily, these models fail to capture the intricate dynamics of pool fires at smaller eddy scales, owing to the absence of advanced turbulence models. Furthermore, their applicability falls short when it comes to accommodating flame tilting in scenarios involving wind influences. Additionally, these models do not provide accurate predictions for the behavior of pool fires in situations involving complex geometric configurations.

On the other hand, the single point source model assumes that the fire can be represented by a single point source that releases heat and combustion products. This model simplifies fire behavior by considering only the heat release rate and the distribution of radiative heat flux. However, this model has several limitations, such as its applicability being limited for fires with a diameter larger than 5 m. Additionally, when modeling large pool fires with smoke effects, it does not account for wind velocity and direction, leading to underestimation of thermal radiation at shorter distances.

Both the solid flame model and the single point source model have their strengths and limitations. The choice of modeling method depends on the specific objectives of the study, available data, and desired level of accuracy. It is important to validate the chosen model against experimental data or real-life fire incidents to ensure its reliability and applicability.

While experimental investigations into pool fires have extensively covered small and medium scales for various hydrocarbon fuels, including crude oil, gasoline, kerosene, jet propellant (JP-4), heptane, diesel, liquefied natural gas (LNG), and ethanol, The large-scale pool fire experiments remain scarce. This scarcity can be attributed to the considerably higher costs associated with conducting large-scale pool fire studies. As a result, there is a growing emphasis on utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) for fire modeling, primarily due to the inherent challenges posed by experiments, especially for larger-scale fires. But It's important to note that CFD simulations can demand significant computational time.

One notable advantage of CFD-based simulations is their potential to offer more accurate outcomes compared to traditional empirical models like solid flame and single-point source models. This improved accuracy arises from the consideration of factors such as geometric obstructions and the ability to handle complex accident scenarios. The ongoing progress in computational technology has further bolstered the development of fire-specific computer codes. CFD codes, such as the Fire Dynamics



Simulator (FDS), possess the capability to offer temporal resolutions that yield valuable insights when evaluating potential scenarios.

Nonetheless, successful CFD fire simulations require valid assumptions and precise boundary conditions. Despite their potential, these simulations are not devoid of challenges, and their accuracy is contingent on various factors, including model setup, grid resolution, and turbulence modeling. As computational technology continues to evolve, the application of CFD for fire modeling holds promise for delivering more detailed and contextually nuanced results.

Modeling a fire using CFD (Computational Fluid Dynamics) for petrol storage tanks is an essential tool in assessing fire safety and designing effective fire protection measures. In this study, the Fire Dynamics Simulator (FDS) is adopted to simulate tank and dike pool fires in a tank farm. This study focuses on utilizing CFD simulations to understand the behavior of fires in petrol storage tanks and predict the thermal effects on the surrounding environment.

The research begins by constructing a comprehensive CFD model that accurately represents the geometry and physical properties of the storage tanks. The model incorporates factors such as tank dimensions, material properties, fuel characteristics, and atmospheric conditions. The fire source is simulated using appropriate combustion models, considering the fuel-air mixture, ignition, and flame propagation.

Experimental data was taken from the 2004 Munoz study in which a series of large outdoor pool fire experiments were conducted using gasoline and diesel fuel placed on top of a layer of water. Five concentric circular pools made of reinforced concrete (1.5, 3, 4, 5, and 6 m in diameter) were used. The experiments were filmed with at least two video cameras registering visible light (VHS) and a thermographic camera (IR). In Munoz's study, thermographic images were used to determine the flames' distribution of emissive power, the mean emissive power, and the radiant heat flux. The contribution of each part of the flame to the total radiated energy was analyzed. A method is presented combining the IR images and the visible images; it offers further insight into the relationship between the heat emitted by the luminous part and the obscured, non-luminous part of the flame. This study analyzed the impact of two different mass burn rate values: 0.055 kg.m-2s-1 (the SFPA reference) and 0.083 kg.m-2s-1 (the value used in Munoz's study). The results demonstrate the effect of these two different mass burn rates on the radiant heat flux for storage tanks of diameters 1.5m, 3m, and 4m. When the value of 0.055 kg.m-2s-1 was applied, radiant heat fluxes of 1.3 kW/m<sup>2</sup>, 1.28 kW/m<sup>2</sup>, and 0.6 kW/m<sup>2</sup> were obtained for the 1.5m, 3m, and 4m diameter tanks, respectively. These results were then calculated as emissivity values of 50.03 kW/m<sup>2</sup>, 67.95 kW/m<sup>2</sup>, and 81.67 kW/m<sup>2</sup>, respectively. On the other hand, when a mass burn rate of 0.083 kg.m-2s-1 was applied, radiant heat fluxes of 1.84 kW/m<sup>2</sup>, 1.72 kW/m<sup>2</sup>, and 0.7 kW/m<sup>2</sup> were obtained for the 1.5m, 3m, and 4m diameter tanks, respectively. The emissivity values were calculated as 56.37 kW/m<sup>2</sup>, 73.8 kW/m<sup>2</sup>, and 84.12 kW/m<sup>2</sup>, respectively, under these conditions.

Through the CFD simulations, various aspects of fire behavior can be investigated, including flame shape, temperature distribution, heat flux, and smoke generation. The results obtained from the simulations provide valuable insights into the potential hazards and risks associated with fires in petrol storage tanks. This information can guide the design of fire prevention and mitigation strategies, such as adequate ventilation, fire suppression systems, and emergency response plans.

Additionally, CFD simulations enable the evaluation of different scenarios, such as varying fire sizes, tank configurations, and fire suppression strategies. By comparing and analyzing the results, optimal design choices can be made to enhance the safety of petrol storage facilities.

The accuracy and reliability of the CFD model are validated by comparing the simulation results with available experimental data and real-life fire incidents. Any discrepancies are carefully analyzed, and improvements to the model are implemented to ensure its accuracy in predicting fire behavior.

In conclusion, modeling a fire in CFD for petrol storage tanks provides a powerful tool for fire safety analysis and design optimization. By accurately simulating fire behavior, potential risks can be identified, and effective fire protection measures can be implemented to minimize the impact of fires in petrol storage facilities. Therefore, the quantitative results obtained through FDS modeling can be used to quantitatively assess the risks of a tank farm and determine safe separation distances between tanks.



## 1. GİRİŞ

Petrol rafinerilerinde yangınlar, büyük maddi hasara ve çevresel zararlara neden olabilen ciddi sorunlardır. Ayrıca, insan güvenliği ve yaşamını tehdit ederler. Bu nedenle, petrol rafinerilerindeki yangın davranışını anlamak ve analiz etmek, etkili önleme ve müdahale stratejileri geliştirmek açısından son derece önemlidir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modelleri, yangın sırasında hareketi, ısıl etkileşimleri ve akısı temsil eder ve simüle eder. HAD, petrol rafinerisindeki yangın sırasında meydana gelen karmaşık fenomenleri incelemek için etkili bir araçtır. Örnek olarak, sıcaklık dağılımı, ısı transferi, kimyasal etkileşimler, duman hareketleri ve hava akımları gibi faktörler incelenebilir.

Bu araştırmanın amacı, HAD modelleme yöntemi kullanarak bir petrol rafinerisindeki yangını modellemektir. Yangın Dinamiği Simülatörü (Fire Dynamics Simulator- FDS) gibi bir simülasyon programı kullanılarak HAD modeli geliştirilecektir. Geliştirilen model, petrol rafinerisinde uygulanacak ve yangının davranışını anlamak ve mevcut yapılar ve sistemler üzerindeki etkisini değerlendirmek için sonuçlar analiz edilecektir.

Bu araştırmanın ana hedefleri şunlardır:

Petrol rafinerisindeki yangını analiz etmek için doğru bir HAD modeli geliştirmek.

Yangın davranışını incelemek ve hava akışları, ısı transferi ve kimyasal etkileşimler gibi faktörlerin etkisini analiz etmek.

Petrol rafinerisindeki yangınla ilgili yapılar ve güvenlik sistemlerinin tepkisini değerlendirmek.

Petrol rafinerisindeki yangına yönelik önleme ve müdahale stratejilerini geliştirmek.

Bu araştırma, petrol rafinerilerinde yangın güvenliği ve risk azaltma konularında değerli bilgiler sağlamayı hedeflemektedir. Bu çalışma, petrol endüstrisindeki yangınların etkilerini anlamak ve gelecekteki yangın olaylarına karşı daha iyi hazırlıklı olmak için önemli bir adım olacaktır.

Yangınlar, kimya ve maden endüstrilerinin güvenliği için önemli bir tehlike olabilir. Özellikle havuz yangınları bu tür tesislerde en sık rastlanan yangın senaryolarındandır ve domino etkisiyle tesisin diğer ekipmanlarını ciddi sonuçlarla etkileyebilir. Son yıllarda, basitleştirilmiş yangın modelleme araçları, hidrokarbon havuz yangınlarının yol açabileceği bazı zararlı etkileri tahmin etmek için kullanıldı. Bunlar sınırlı sayıda senaryoya uygulanabilse de, yangın davranışını yöneten genel özellikleri kapsayamazlar.

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) modellemesi, ilgili yangın etkileri hakkında daha ayrıntılı bilgiler sağlayabilir, karmaşık geometrileri dikkate alabilir ve küçükten büyüğe yangınları temsil edebilir. Ancak, bu araçların tahmin yeteneklerini değerlendirmek için simülasyon sonuçları öncelikle deneysel ölçümlerle karşılaştırılmalıdır.

### **1.1. Motivasyon**

**Yangın Güvenliği İyileştirme:** Petrol rafinerileri karmaşık tesislerdir ve potansiyel olarak tehlikeli yangın risklerine sahiptir. HAD modellemesi, yangın güvenliği önlemlerini optimize etmek ve yangın risklerini azaltmak için kullanılabilir. Bu çalışma, petrol rafinerisindeki yangın güvenliği konusunda daha iyi bir anlayış sağlamayı hedeflemektedir.

**İyileştirilmiş Yangın Tahmini:** HAD modellemesi, petrol rafinerisindeki yangınların nasıl yayıldığını, sıcaklık dağılımını, duman hareketini ve diğer önemli parametreleri tahmin etmek için kullanılır. Bu çalışma, yangınların tahmin edilmesinde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır.

**Performans Değerlendirmesi:** Petrol rafinerilerinde meydana gelebilecek yangın durumlarını anlamak ve yangın müdahale stratejilerini optimize etmek için gerçekçi bir model geliştirmek önemlidir. HAD modellemesi, yangın davranışını, duman hareketini ve ısı transferini etkileyen faktörleri değerlendirebilir ve rafineri personelinin yanma sürecini daha iyi anlamasına yardımcı olabilir.

### **1.2. Hedefler**

**HAD Modelinin Geliştirilmesi:** Petrol rafinerisi için geçerli ve doğru bir HAD modeli geliştirmek, yangın süreçlerini ve yangınla mücadele stratejilerini daha iyi anlamak

için temel bir adımdır. Bu model, rafinerinin fiziksel özelliklerini ve işletme koşullarını doğru bir şekilde yansıtmalıdır.

Yangın Davranışının Analizi: HAD modellemesi kullanılarak, rafineri içerisindeki yangın durumlarının davranışını analiz etmek hedeflenir. Yangının yayılma hızı, sıcaklık dağılımı, duman hareketi ve ısı transferi gibi parametreler, model kullanılarak değerlendirilebilir. Bu analizler, rafineri personelinin yangın güvenliği için doğru önlemleri almasına yardımcı olabilir.

Yangın Müdahale Stratejilerinin Optimizasyonu: HAD modeli, rafineri yangınlarına müdahale stratejilerinin etkilerini değerlendirmek için kullanılabilir. Örneğin, yangın söndürme sistemlerinin yerleşimi, yangın alarm sistemleri ve tahliye yolları gibi önlemler, model kullanılarak optimize edilebilir.

Bu tez, petrol rafinerisindeki yangınların HAD modellemesiyle analiz edilmesi konusunda daha fazla bilgi sağlamayı ve rafineri güvenliği alanında iyileştirmeler yapmayı hedeflemektedir.

### **1.3. HAD Teknolojisine ve Gelişimine Genel Bakış**

Son yıllarda, HAD (CFD Computational Fluid Dynamics) kullanarak yangın modellenmesinde büyük bir ilerleme kaydedilmiştir. HAD, yangın davranışını tahmin etmek için akışkan akısının kısmi diferansiyel denklemlerini sayısal olarak çözer. Bu sayede, yangın sürecindeki hava akısı, duman yayılımı ve ısı transferi gibi önemli faktörleri analiz etmek mümkün olur.

Yangın modellenmesinde HAD'nin kullanımı, geleneksel yangın modellerine göre birçok avantaj sunar. HAD modelleri, karmaşık geometrilerdeki hava ve duman hareketini daha etkili bir şekilde tahmin edebilir. Ayrıca, yanma ve ısı transferi gibi kimyasal ve fiziksel süreçleri ifade eden alt modelleri içerir. Bu da daha gerçekçi ve ayrıntılı sonuçlar elde etmeyi sağlar.

HAD modelleri, yangın güvenliği mühendisleri ve araştırmacılar tarafından yangın riskinin değerlendirilmesi, yangın yayılımının tahmini ve yangın güvenlik önlemlerinin optimize edilmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca, yangın sırasında insanların ve yapıların davranışını analiz etmek için de kullanışlıdır (McGrattan ve ark, 2013).

#### **1.4. Petrol Yangınları Alanında HAD Simülasyonu**

Petrol yangınları, büyük ölçekli ve karmaşık yanma süreçlerine sahip potansiyel olarak tehlikeli olaylardır. Bu tür yangınları anlamak, önlemek ve yönetmek için HAD (CFD Computational Fluid Dynamics) simülasyon yöntemi kullanılmaktadır.

HAD, petrol yangınlarının modellenmesi için kullanılan güçlü bir araçtır. Petrol yangınlarında HAD 'nin kullanımı, yangının yayılımı, duman ve sıcaklık dağılımı, hava akısı ve ısı transferi gibi önemli faktörlerin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu bilgiler, yangın güvenliği mühendislerine, yangın riskini değerlendirmelerine ve yangınla mücadele stratejilerini geliştirmelerine yardımcı olur.

HAD modelleri, yangın sırasında yanma süreçlerini, duman hareketini ve ısı transferini hesaplamak için karmaşık matematiksel denklemleri kullanır. Bu modeller, yanma ürünlerinin dağılımını, yangının yayılma hızını, ısı yayılımını ve dumanın yerleşimini tahmin etmek için bilgisayar simülasyonları yapar. Ayrıca, bu modeller, yangın sırasında oluşabilecek tehlikeli durumları ve yangına maruz kalan yapıların davranışını analiz etmek için kullanılır.

HAD teknolojisinin kullanımı, yangın güvenliği ve risk analizi alanında büyük bir gelişme sağlamıştır. Petrol endüstrisinde, yangınların olası etkilerini değerlendirmek ve yangın güvenliği önlemlerini optimize etmek için HAD modelleri kullanılmaktadır (Shen ve ark, 2020).

## 2. SİMÜLASYON AMAÇLARI VE HEDEFLERİ

Bu araştırmanın amacı, bir yangın söndürme sisteminin tasarımında ve analizinde bilgisayar destekli akışkanlar dinamiği analizi (HAD) tekniğini kullanmaktır. Bu, hareket modelleme, termal etkileşim, basınç dağılımı ve çevreleyen ortamdaki akışlar kullanılarak sanal bir yangın deneyi gerçekleştirilerek yapılır.

Araştırmanın bir yönü, ışıınımsal enerji denklemlerine dayalı ışıınımsal termo-analiz sonuçlarını pratik deneylerle karşılaştırmaktır. Bu, bilgisayar modellemesinden elde edilen sonuçların geçerliliğini ve güvenilirliğini doğrulamayı ve gerçek bir yangın durumunda sistem davranışını tahmin etme yeteneklerini doğrulamayı amaçlar.

Araştırmacılar, HAD teknolojisini kullanarak incelenecek binanın veya yapının 3B modelini oluşturabilir ve sıcaklıkların, hava akımlarının, akışların ve diğer ilgili değişkenlerin dağılımını gösterebilir. Sıvıların ve gazların termal ve mekanik etkileşimlerini ve akışlarını analiz etmek için fiziksel yasalar ve matematiksel denklemler uygulanır.

Fiziksel denklemlere dayanan termoradyatif analizin sonuçları ile deneylere dayalı pratik sonuçlar karşılaştırılarak, HAD modellemenin sistem davranışını ve farklı yangın durumlarına tepkiyi tahmin etmedeki etkinliği ve doğruluğu değerlendirilebilir. Bu, yangın söndürme sisteminin tasarımının iyileştirilmesine ve yangının yapı ve personel üzerindeki etkisini ve tehlikesini azaltmak için en etkili önlemlerin seçilmesine yardımcı olur.

HAD gibi modern teknolojilerin kullanımı, yangın söndürme sistemlerinin daha doğru ve etkin analiz ve tasarımı için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bir yangın durumunda ısı dağılımı ve akışları hakkında ayrıntılı bilgi sağlamak, doğru mühendislik kararlarının alınmasına ve güvenlik ve yangın önleme önlemlerinin iyileştirilmesine yardımcı olur.

## 2.1. Tezin Anahatları

Bu tez şu şekilde yapılandırılmıştır:

Bölüm 1, özellikle petrol endüstrisinde HAD teknolojisinin gelişimine ilişkin bir arka plandan oluşmaktadır.

2. Bölüm, bu araştırmanın amaçlarını, kapsamını ve anahtarlarını açıklamaktadır.

Bölüm 3, petrol tankların çeşitleri, tasarımı, yerleşimi ve düzeni, tehlikeler, planlama, tutuşma kaynakları ve nedenleri, yangından korunma ve yangının bir tanktan diğerine yayılmasını içeren geçmiş olaylar dahil olmak üzere atmosferik depolama tanklarının tiplerine ilişkin arka plandan oluşmaktadır.

Bölüm 4, petrol tanklarından çıkan yangınlardan kaynaklanan radyant ısının etkilerinden bahsediyor, ve petrol tanklarındaki koruma sistemlerinden bahsediyor.

Bölüm 5, Petrol yangınlarının modellemesiyle ilgili literatür taramasını sunar. Hidrokarbon tank yangınları için HAD modeli, modelin kullanımı için gerekli tüm denklemler dahil olmak üzere ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Model, bazı araştırmacılar tarafından yürütülen gerçek deneylerle karşılaştırılır ve doğrulanır.

Bölüm 6, araştırmanın sonucundan bahsetmektedir.

## 2.2. Kapsam

Bu tez, petrol rafinelerinde meydana gelen yangın olaylarının, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi kullanılarak matematiksel olarak modellenmesi ve analiz edilmesi amacını taşımaktadır. Tez çalışması aşağıdaki ana unsurları kapsamaktadır:

Litaratür İncelemesi: Tezin ilk aşaması, petrol rafinelerindeki yangınların tarihçesi, nedenleri, etkileri ve mevcut güvenlik önlemleri hakkında kapsamlı bir literatür incelemesini içermektedir. Bu aşama, mevcut bilimsel çalışmaların gözden geçirilmesiyle başlayacak ve HAD yönteminin benzer uygulamalarını incelemekle devam edecektir.

HAD Yöntemi ve Model Geliştirme: Tezin temel aşamalarından biri, HAD yöntemini petrol rafinerileri yangınları için uyarlamak ve bu yöntemi kullanarak yangınların matematiksel modelini geliştirmektir. Bu aşamada, yangın parametreleri ve rafineri tesisinin özellikleri dikkate alınarak bir simülasyon modeli oluşturulacaktır.



Veri Toplama ve Analiz: Gerçek yangın olaylarına dair verilerin toplanması ve analizi, tezin önemli bir bileşenini oluşturacaktır. Yangın olaylarının önceden kaydedilmiş verileri, modelin tasarımı ve doğrulama aşamalarında kullanılacaktır.

Simülasyon Sonuçlarının İncelenmesi: Tez çalışması, HAD modelinin kullanılmasıyla elde edilen simülasyon sonuçlarının analizini içerecektir. Bu sonuçlar, rafinerilerdeki yangınların dinamiklerini ve davranışlarını anlamak amacıyla incelenecektir.

Sonuçlar ve Öneriler: Tez çalışması, HAD ile modelleme sonuçlarına dayalı olarak, petrol rafinelerindeki yangınların önlenmesi ve kontrol edilmesi için öneriler sunacaktır. Ayrıca, tezin sonuç bölümü, elde edilen bulguların endüstriyel uygulamalara ve güvenlik politikalarına olan potansiyel etkilerini tartışacaktır.

Bu tez çalışması, petrol rafinelerindeki yangınların daha iyi anlaşılmasına ve gelecekteki yangın olaylarının önlenmesine yönelik önemli bir katkı sunmayı hedeflemektedir.



### 3. HİDROKARBON DEPOLAMA TANKI TASARIM STANDARTLARI

APA 650 ve NFPA 30, hidrokarbon depolama tanklarının tasarımında ve güvenliğinde kullanılan iki önemli referanstır.

APA 650, "Petrol Depolama Tanklarının Kaynaklı Tasarım Standartları" olarak bilinen bir standarttır. Amerikan Petrol Enstitüsü (API) tarafından yayınlanmıştır ve petrol endüstrisinde geniş kabul görmektedir. Bu standart, depolama tanklarının boyutları, kapasiteleri, malzemeleri, kaynakları, yükleme ve boşaltma işlemleri, güvenlik önlemleri ve diğer unsurlarını kapsar. API STD 650 olarak da bilinir ve tank tasarımcıları, mühendisleri ve operatörleri doğru ve güvenli tank tasarımına yönlendirir.

NFPA 30 ise "Flammable and Combustible Liquids Code" olarak bilinen bir standarttır. Ulusal Yangın Koruma Birliği (NFPA) tarafından yayınlanmıştır ve yangıcı ve yangıcı olmayan sıvılarla ilgili güvenlik gereksinimlerini belirler. NFPA 30, yangın tehlikelerini azaltmak ve tehlikeli sıvıların doğru şekilde depolanmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Bu standart, sıvı depolama tanklarının yerleştirilmesi, sızıntı önleme, yangın söndürme sistemleri, drenaj sistemleri ve diğer güvenlik önlemlerini kapsar.

APA 650'deki standartlar ve yönergeler, depolama tanklarının tasarımında önemli birçok yönü içermektedir, bunlar arasında:

**Boyutlar ve kapasite:** Standart, depolama tanklarının gereken boyutları, istenen kapasiteye ve depolama için mevcut alanın kullanılabilirliğine dayanarak belirtmektedir.

**Malzemeler ve kaynaklar:** Referans, tankların imalatında kullanılacak malzemelerin gerekliliklerini ve kaynak ayrıntılarını belirlemektedir.

**Yükleme ve boşaltma:** APA 650, tankların yükleme ve boşaltma işlemleriyle nasıl başa çıkılacağını, boşaltma yöntemlerini ve hidrokarbonların taşınmasını açıklamaktadır.

**Güvenlik ve emniyet:** Standart, güvenli ve güvenilir tank tasarımı için gereken güvenlik ve emniyet önlemleri konusunda yönlendirmeler sağlamaktadır.

APA 650 referansı, hidrokarbon depolama endüstrisinde güvenilir ve tanınmış bir referans olarak kabul edilmektedir ve tank tasarımlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu iki referans, hidrokarbon depolama tanklarının tasarımında ve güvenliğinde önemli bir rol oynamaktadır. APA 650, tankın yapısal ve mekanik özelliklerini yönlendirirken, NFPA 30 tankın yangın güvenliğini ele almaktadır.

### 3.1. Üstü Açık, Yüzer Tavanlı Tank

Açık üstlü yüzer çatılı tanklar, petrol, petrokimya ürünleri ve diğer yanıcı sıvıların depolanması için kullanılan bir depolama tankı türüdür. Bu tanklar, içerisindeki sıvının buharlaşmasını azaltmak ve dış etkenlere karşı korumak için tasarlanmıştır.

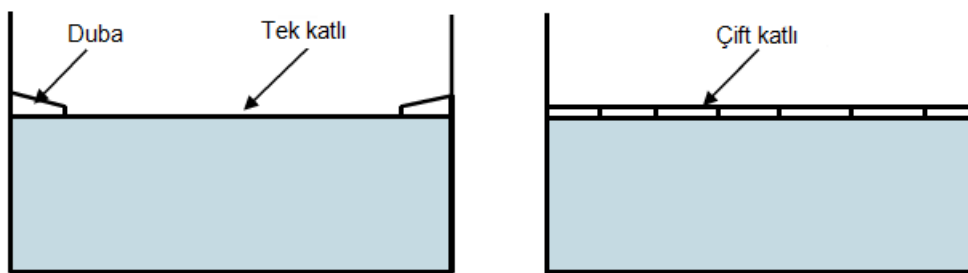
Açık üstlü yüzer çatılı tankın temel yapısı, bir çelik kabın üzerine yerleştirilen yüzen bir çatıdan oluşur. Bu çatı, sıvının seviyesine bağlı olarak yukarı-aşağı hareket edebilen bir yapıya sahiptir. Sıvı seviyesi yükseldiğinde, yüzen çatı yükselerek daha fazla alan sağlar. Bu, sıvının buharlaşmasını azaltır ve oksidasyonu önler.

Açık üstlü yüzer çatılı tankların avantajları arasında şunlar yer alır:

- Sıvı seviyesinin değişkenliğine uyum sağlar.
- Sıvının buharlaşmasını azaltır ve kaybını önler.
- Sıvının atmosferik etkilerden korunmasını sağlar.
- Daha az oksidasyon ve kirlenme riski sunar.
- Ancak, açık üstlü yüzer çatılı tankların bazı dezavantajları da vardır:

Sıvı seviyesi düştüğünde, yüzen çatının altında boşluk oluşabilir ve bu durum sıvının buharlaşmasını artırabilir.

Yüzen çatının hareketli parçaları, düzenli bakım gerektirebilir (Amerikan Petrol Enstitüsü, 2013).



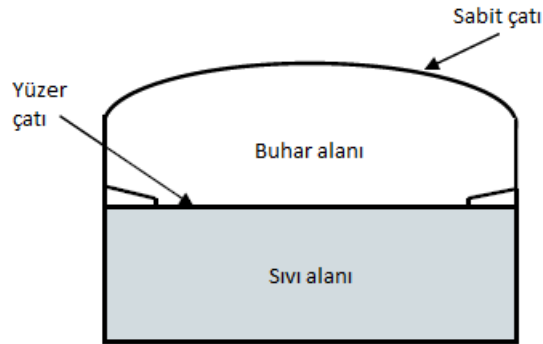
**Şekil 3.1.** Yüksek derecede uçucu petrol ürünlerinin depolanmasında yaygın olarak kullanılan üstü açık, yüzer tavanlı tanklara örnek

### 3.2. Dahili, Yüzer Tavanlı Tank

Dahili, yüzen tavanlı tanklar, sıvı depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir tank tasarımıdır. Bu tanklar, sıvıların depolanması için kullanılırken, içerisinde bulunan yüzen tavan sayesinde sıvı seviyeleri arasındaki boşluğu optimize ederler. Bu tasarım, sıvıların oksidasyonunu ve buharlaşmasını azaltmaya yardımcı olurken, aynı zamanda çevresel ve güvenlik faktörlerini de göz önünde bulundurur.

Dahili, yüzen tavanlı tankların temel avantajlarından biri, sıvı seviyesindeki değişikliklere bağlı olarak tavanın yükselip alçalabilmesidir. Bu, tankın içerisindeki boşluğun optimum seviyede tutulmasını sağlar ve sıvının maruz kaldığı hava miktarını azaltır. Bu da sıvının oksidasyonunu ve buharlaşmasını minimize eder.

Bu tank tasarımı, çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır, özellikle petrol ve kimyasal ürünlerin depolanmasında (API, 2013).



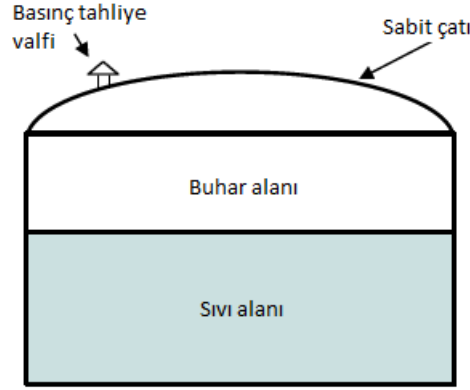
**Şekil 3.2.** Dahili, yüzer tavanlı bir tankın tipik örneği (hem sabit tavanlı hem de yüzer tavanlı tankları gösteriyor)

### 3.3. Sabit Tavanlı Tanklar

Sabit tavanlı tanklar, sıvı depolama sistemlerinde kullanılan bir diğer tank tasarımıdır. Bu tanklar, üst kısmında sabit bir tavana sahiptir ve genellikle düşük basınçlı veya atmosferik depolama için tercih edilir.

Sabit tavanlı tanklar, özellikle petrol ürünleri, kimyasallar, su ve diğer sıvıların depolanması için kullanılır. Bu tanklar genellikle yer altında veya yer üstünde bulunabilir ve depolama kapasiteleri farklılık gösterebilir.

Bu tankların tasarımı, güvenlik, dayanıklılık ve sızdırmazlık gibi faktörleri dikkate alır. Sabit tavanlı tanklar, sıvıların dış etkenlerden korunmasına yardımcı olur ve buharlaşma, oksidasyon veya dış kirlenme gibi sorunları en aza indirir (API, 2013).



**Şekil 3.3.** Tipik sabit tavanlı tank: sabit tavan koni veya kubbe şeklinde olabilir

### **3.4. Tutuşma Kaynakları**

Amerikan Petrol Enstitüsü (2003)'ne göre, petrol tanklarında yangınların en yaygın nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

#### **3.4.1. Elektrik kıvılcımları**

Elektrik ekipmanlarının kullanımı veya arızası, elektrik kıvılcımlarına veya arklara neden olarak yanıcı maddelerle temas ederek yangına yol açabilir.

#### **3.4.2. Yanıcı gaz sızıntıları**

Yanıcı gazların sızması, tankın içinde veya çevresinde birikerek patlama veya yangın riskine yol açabilir. Bu sızıntılar, kapaklardaki kaçaklar, valf arızaları veya işletme hataları gibi çeşitli nedenlerle oluşabilir.

#### **3.4.3. Yanıcı sıvı sızıntıları**

Yanıcı sıvıların sızması, tankın dışına yayılarak yangın riskini artırabilir. Sızıntılar genellikle taşıma hataları, valf arızaları veya ekipman hasarlarından kaynaklanır.

#### **3.4.4. İnsan hataları**

İşletme hataları, yanlış prosedürlerin uygulanması, ekipman bakımının ihmal edilmesi veya yangın güvenliği önlemlerine uyulmaması gibi insan faktörleri, yangınların nedeni olabilir.

#### **3.4.5. Radyasyon ısıya maruz kalma**

Depolama tankları, çevredeki yanıcı malzemelerin yoğun olduğu bir ortamda bulunabilir. Eğer yakındaki bir yangın varsa, radyasyon yoluyla ısı yayılabilir ve tankın yüzeyi üzerinde birikerek yangına neden olabilir.

#### **3.4.6. Yıldırım arpması**

Hidrokarbon depolama tankları genellikle yüksek ve açık alanlarda bulunur. Bu nedenle yıldırım çarpması riski altındadır. Yıldırımın direkt olarak tanka çarpması, elektriksel kıvılcımlara ve yangına yol açabilir (Necci ve ark, 2014).

#### **3.4.7. Kendiliğinden ignisyon**

Bazı hidrokarbonlar, belirli sıcaklık ve basınç koşullarında kendiliğinden tutuşabilme özelliğine sahiptir. Bu, depolanan hidrokarbonların doğal olarak ortamda bulunan ısı kaynaklarına veya kimyasal reaksiyonlara maruz kaldığında yanma potansiyeli taşıdığı anlamına gelir.

#### **3.4.8. Sızıntılar**

Tanklardan hidrokarbon sızıntısı, yapısal hasar veya sistem arızası nedeniyle oluşabilir ve bu sızıntılar, tankların etrafında yanıcı gazların birikmesine ve ardından yangının başlamasına neden olabilir.

#### **3.4.9. Statik elektrik**

Depolama tanklarında malzeme hareketi veya sürtünme sonucu statik elektrik yükleri oluşabilir ve ani elektrik deşarjları meydana gelirse, bu, kıvılcım üretebilir ve yanıcı gazların tutuşmasına yol açabilir (API, 2003).

#### **3.4.10. Açık alev**

Kaynak veya kesme işlemleri sırasında veya depolama tanklarına yakın bir noktada açık alev kullanımı, gerekli önlemlerin alınmadığı durumlarda kıvılcıma ve yanıcı gazların tutuşmasına neden olabilir.

#### **3.4.11. Aşırı ısıtma**

Depolama tanklarının güvenli sınırların üzerinde ısıtılması durumunda tutuşma olabilir, bu da depolanan maddelerin sıcaklığının artmasına ve sonunda hidrokarbonların yanmasına neden olabilir (API, 2005).

### **3.5. Tankların Konumu ve Düzeni**

Bir sıvı hidrokarbon atmosferik depolama tankı tesisinin yeri, yangın güvenliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve bir tank çiftliğindeki tankların konumu, tank çiftliğinde meydana gelen yangınların çiftliğe yayılmasını önleyecek şekilde düzenlenebilir. Ayrıca, bitişik bitkiler ve mülk, bir tank çiftliğindeki yangından

etkilenmeyecek şekilde yerleştirilebilir. Parlayıcı sıvıların sabit tavanlı tanklarda depolanmasına ilişkin Sağlık ve Güvenlik İcra kılavuzu (HSG 176, 1998), depolama tankları ile binalar, sınırlar, ateşleme kaynakları ve proses birimleri arasındaki kabul edilebilir mesafeleri belirler. Ayrıca NFPA30 (2021), tanklar arasındaki boşluk ve tanklardan mülk hatlarına ve bitişik yapı ve tesislere olan mesafelere ilişkin gereklilikleri ana hatlarıyla belirtir. Bu mesafeler minimum mesafelerdir ve artan mesafe, tırmanma riskini azaltacağından, yeni bir tesis inşa edilirken daha fazla boşluk faydalı olabilir.

Uluslararası mühendislik kodları, tanklar arasındaki ve tanklar ile yığın duvarları arasındaki gerekli mesafeyi belirtir ve her bir mühendislik kodu, tank aralığı gerekliliklerinin çeşitli tanımlarını sağlar.

Boşluk önerilerinin kökenleri belirsizdir, ancak iki amacı olduğu görülmektedir:

Tüm yüzeyi kaplayan bir tank yangınından çıkan alevlerin bitişikteki bir tanka çarpmasının önlenmesi

Yangınla mücadele operasyonları için yeterli erişim ve kaçış yollarının sağlanması.

Alev çarpması olası değilse, bitişik bir tanka ısı transferi için baskın mekanizma radyant ısıdır. LASTFIRE olay araştırması Mansur (2012)'ye göre, bitişikteki bir tankın içeriğinin depolama sıcaklığına yakın bir kaynama noktası olmadıkça, tam yüzeyli bir yangının ilk birkaç saatinde radyan ısı yoluyla yükselme olası değildir. Çalışma ayrıca, kaynama noktasına yakın bir sıcaklıkta depolanan ürünü içeren tanklar için radyan ısının bitişik bir depolama tankının çatısına transferinin, radyan ısı yoluyla yükselme açısından önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Çalışmanın sonuçları, ışımsal ısı transferinde herhangi bir önemli azalma varsa, tanklar arasındaki aralığın bir çaptan daha büyük olacak şekilde artırılması gerektiğini önerdi.

### **3.6. Atmosferik Depolama Tankı Yangın Vakaları**

Atmosferik depolama tankı yangın vakaları, endüstriyel güvenlik açısından büyük bir endişe kaynağıdır, çünkü bu tür tanklar genellikle yanıcı ve/veya tehlikeli kimyasalları büyük hacimlerde içermektedir. Tank kazalarının sıklığı düşük olsa da (ortam sıcaklık ve basınçtaki depolama tankları için tank başına yılda  $15 \times 10^{-5}$ ) (Thyer ve ark, 2009), sonuçları felaket olabilir ve can kaybı, büyük çevresel etki ve büyük ticari kayıplara neden olabilir.



Chang ve Lin (2006) tarafından 1960-2003 yılları arasında gerçekleştirilen ve 242 depolama tankı kaza olayının incelendiği bir çalışma, kazaların daha sık olarak petrol rafinerilerinde meydana geldiğini, bunların 116 olay (%47.9) olduğunu ortaya koymuştur. İkinci en sık karşılaşılan kazalar ithalat/ihracat terminallerinde meydana gelmiştir ve bu kategoride 64 vakaya (%26) rastlanmıştır. Son olarak, petrokimya tesislerinde meydana gelen olaylar tüm kazaların yaklaşık %25'ini oluşturmuştur. En yaygın tank içerikleri ham petrol ve benzin, yakıt yağı ve dizel gibi petrol ürünleridir. Çalışma ayrıca, yangınların açık üstlü yüzer çatılı tanklarda sabit tavanlı tanklara göre daha sık meydana geldiğini göstermiştir; ancak her iki tank türü de ham petrol, benzin ve dizel yağının depolanması için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kayıpların en sık nedeni yangın olup 145 vakada bu tür olaylar meydana gelmiştir, ikinci sırada patlamalardır. Yangınlar ve patlamaların en yaygın nedeni yıldırım ve bakım hatalarıdır. Geriye kalan vakalar, operasyonel hatalar, ekipman arızaları, tankın alt kısmında veya kaynaklı kenarlarda meydana gelen çatlaklar, sızıntılar ve hat kopmaları, statik elektrik, açık alevler ve sabotaj gibi nedenlerden kaynaklanmıştır.

### **3.6.1. Tek tank vakaları**

Tank olaylarının incelendiği Thyer ve ark. (2009) tarafından yapılan bir değerlendirmede, 1919-2004 yılları arasında 64 tek tank arızası belirlenmiştir. Bu arızaların nedenleri, yüzer çatıların batması, depolama tankının duvarlarının korozyonu ve kırılma kırılması gibi faktörlere bağlanmıştır. Bu olayların birçoğunun sonuçları büyüktü. En büyük sızıntı, 18 Aralık 1974 tarihinde Japonya'da Kurashiki Şehri'ndeki Mitsubishi Petrol Rafinerisi'nde meydana geldi. 50.000 m<sup>3</sup> ham petrol depolama tankı aniden parçalandı ve büyük miktarda petrol denize sızdı, bunun sonucunda yüzer çatının batması gerçekleşti. Bu hasarın maliyeti 78 milyon sterlini aştı.

Ağustos 2008'de, Libya'nın en büyük petrol rafinerisi olan Ras Lanuf'ta 80.000 m<sup>3</sup> kapasiteli bir ham petrol atmosferik depolama tankında yangın çıktı. Depolama tankı, rutin bakım operasyonları sırasında ateş aldı ve yangının nedeni sıcak iş olarak belirlendi. Kaza ülkeyi günlük 16.000 m<sup>3</sup> petrol üretimini azaltmaya zorladı ve itfaiye ekiplerinin yangını söndürme çabalarına rağmen, yangın 9 gün boyunca devam etti. Neyse ki, yangın sadece bir tankla sınırlı kaldı (Mansur, 2012).

### 3.6.2. Çoklu tank olayları

Thyer ve ark. (2009) tarafından yapılan daha ciddi yangınların tarihsel kaydı, tank yangınlarının diğer tanklara veya kaynama durumuna nasıl yayıldığı hakkında bilgi vermektedir. Thyer ve ark (2009), daha ciddi tank yangını olaylarının %5-10'unun yaklaşık yarısının (44%) iki veya daha fazla tankı içerecek şekilde yayıldığını belirtmiştir. Bu yayılımlardan bazıları oldukça büyük ölçekliydi, örneğin Buncefield, İngiltere ve Hancock Rafinerisi, California'daki olaylar. Bu olaylar ya tesisin tamamen kaybedilmesine veya yatırımın büyük bir kısmının kaybedilmesine neden oldu.

Persson ve Lönnermark (2004) tarafından yapılan bir çalışma, 1950-2003 yılları arasında dünya genelinde 480 depolama tankı yangını olayını belirlemiştir. Belirlenen her bir yangın olayının kapsamı önemli ölçüde değişmekte olup, sadece halka yüzeyindeki bir yangının kolaylıkla söndürüldüğü durumlardan, 30 ila 40 yanmakta olan tankı içeren bir tank depolama tesisini etkileyen yangınlara kadar çeşitli durumlar söz konusu olmuştur. Yangın ve söndürme operasyonu hakkında tam veya neredeyse tam bilgi elde edilebilen sadece 30 tank yangın olayı bulunmuştur.

#### 4. ATMOSFERİK DEPOLAMA TANKLARI ÜZERİNDE RADYANT ISININ ETKİSİ

Beyler ve Hirschler (2002)'ın belirttiği gibi, büyük açık hidrokarbon yangınlarının neden olduğu hasarın temel sebebi radyasyondur. Bu yöntem, ateşle doğrudan temas olmadan nesnelerin bir yangınla uzaktan ısıtılmasına ve ateşlenmesine yol açar. Dolayısıyla, radyant ısı akısı, bir nesneden diğerine alevlerin yayılmasına neden olur.

Bir atmosferik depolama tankının yanıcı bir sıvı içeren yanıcı bir yangına maruz kalması durumunda ateşlenip hasar görmesi için tankın yüzeyine düşen radyant ısı akısı belirlenmelidir.

Yangından bir tanka düşen radyant ısı akısını tahmin etmek, aşağıdaki önemli parametreleri değerlendirmek için bir araç sağlar:

- Yanlılıkla bir yan tankın ateşlenip ateşlenmeyeceğini veya ne zaman ateşleneceğini tahmin etmek
- Yangın çevresindeki tesis ve mülke verilecek hasarın tahmini
- Depolama tankları arasındaki güvenli ayırma mesafelerinin tahmini
- Eskalasyonu önlemek için gereken koruma türü ve seviyesinin tahmini.

LASTFIRE olay incelemesi (2012), tanktan tanka radyant ısı aracılığıyla eskalasyonun, yanıcı maddelerin depolama sıcaklığına yakın kaynama noktasına sahip olmadığı durumlarda, tam yüzeyli bir yangının ilk birkaç saatinde olası olmadığı sonucuna vardı. Bu tür ürünler için, yan tankın çatısına radyatif ısı transferinde önemli bir faktör olan bir tanktan diğerine olan mesafenin bir çap büyütülmesi gerekmektedir.

IP Model Code of Safe Practice, Part 19 (1993), radyant ısı hesaplamalarının yapıldığı ve bitişik bir tankın  $8 \text{ kW.m}^{-2}$ 'den fazla radyant ısı aldığı ortaya çıkarsa, eskalasyonu önlemek için soğutma suyunun uygulanabilir olması gerektiğini önermektedir.

Eskalasyon için gereken radyant ısı akısı miktarı, bitişik bir tankta depolanan yakıt türüne bağlıdır. Genellikle  $8 \text{ kW.m}^{-2}$ 'lik bir akış konservatif kabul edilir ve bazı operatörler  $12.5 \text{ kW.m}^{-2}$  bir rakam kullanır: bu, arkadan yalıtılmış çıplak bir çelik plakanın sıcaklığını  $300^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltmek için gereken yaklaşık ısı akısını temsil eder.

Bu sıcaklıkta, metal yüzeyler otomatik ateşlenme için gereken sıcaklığa ulaşır ve buhar alanındaki yakıt buharı/hava karışımının üst patlama limitinin oldukça üzerinde olması muhtemeldir.

Tankın çelik yüzeyine radyant ısı akısı azaltmanın bir başka yolu da, pasif yangın koruması veya yalıtım kullanmaktır. Ancak, tank ve çatı üzerindeki ek yük sorunları, uygulamadan sonra çeliğin denetlenmesi ile ilişkili zorluklar ve kurulum maliyeti, bunun uygulanabilir olmadığını göstermektedir.

Hidrokarbon havuz yangınlarının boyutunu ve şeklini ve harici nesnelere olan radyasyon ısı akısını tahmin eden birkaç havuz yangını modeli bulunmaktadır: bunların çoğu "katı alev modelleri" olarak adlandırılır ve alev, yüzeylerinden termal radyasyon yayılan bir veya daha fazla basit geometrik şeklin (genellikle bir koni veya eğik veya eğik bir silindir) bir kombinasyonu olarak modellenir. Alev şeklini ve yüzey radyasyon yayılmasını tanımlayan ilişkiler, yer tabanlı havuz yangını deneylerinden elde edilir ve yapılan az miktarda doğrulama çalışması, temel bir alevin özelliklerinin büyük ölçekli bir yer tabanlı yangın ile bir tank üstü yangını arasında önemli ölçüde değişmediğini göstermektedir (Lautkaski, 1992). Bununla birlikte, bir tank üstü yangın modelinin, bir yanındaki tanklara yönelik yakın alandaki radyant ısı akısının tahminini etkileyen iki etkisi vardır:

- Bir tankın etrafında esen rüzgar, tankın rüzgarın aşağı doğru çektiği tankın üstünden aşağı doğru sürüklenmesine yol açar. Bu alev sürüklenme tahmini, alevi bir aşağı doğru tanka daha yakın getirir ve bu önemlidir.
- İkinci olarak, alevin alt bölgesi ve alt kısmı, üst kısmı tarafından gizlenen koyu dumanla karşılaştırıldığında çok daha parlak ve temiz bir şekilde yanar. Bir tank üstü yangın modeli, yakınlardaki aşağı doğru tanklara yönelik radyant ısı akısının tahminini etkilediği için bu alevin alt bölgesini tahmin etmelidir.

#### **4.1. Atmosferik Depolama Tanklarının Yangından Korunması**

Depolama tankları, birçok neden ve türde yangın riski oluştururlar. Genel olarak, depolama tankları, bir yerde depolanan nispeten büyük miktardaki yakıtlar veya kararsız sıvılar nedeniyle hayat ve mülk için önemli bir potansiyel risk taşırlar. Bu nedenle, yangın koruma prensipleri mühendislik kodlarına ve standartlarına dahil edilmiş ve birçok endüstri, mühendislik kodlarında belirtilenden daha koruyucu olan ek uygulamalar geliştirmiştir.

Yangının türü, tank yangınlarıyla ilişkili tehlikelerin doğasını, türünü ve ciddiyetini belirler. Sabit çatılı tanklarla ilişkili en yaygın yangınlar, tankın dış borularda sızıntıya veya havalandırmaya bağlı olarak ortaya çıkar. Ancak, sabit çatılı tank buhar boşluklarında yangınlar ve patlamalar da meydana gelir ve bu yangınlarla her zaman ciddi kayıplar yaşanır. Eğer sabit çatı çöker ve yangın sıvının yüzeyine yayılırsa, buna tamamen içerisinde yangın olan bir durum denir. Öte yandan, depolama tanklarındaki yüzer çatı tasarımı, yangın tehlikelerini azaltmak için büyük ölçüde uygulanmıştır. Ancak, LASTFIRE olay incelemesi (1997)'ne göre, birçok tank yangını yüzer çatılı tankları içermektedir. Çatı sıvı yüzeyinde oturduğu için tamamen içerisinde yangın olan durumlar çok nadirdir, ancak çatının devrilmesi veya batması durumunda yangın sıvının tamamı üzerine yayılabilir.

Genel olarak, atmosferik depolama tankı yangınları nadir olaylardır, özellikle birden fazla tankı içerenler. Tank aralığı dışında, mevcut mühendislik kodları bir tank yangınının etkilerini hafifletmek ve eskalasyonu önlemek için gerekli kaynakları veya önlemleri ele almamaktadır.

#### **4.1.1. Su soğutma sistemleri**

Bitişik bir atmosferik depolama tankının duvar ve çatısının soğutulması, çeliğin çökmesine, yanıcı buharların atmosfere salınmasına veya sıcak yüzeylerin ateş kaynağı oluşturmaya neden olmayacak şekilde sıcaklıkların kabul edilebilir sınırlarda tutulmasının etkili bir yoludur.

Su püskürtme gereksinimleri, mühendislik kodları arasında oldukça değişkenlik göstermektedir. Genel olarak, tank yüzeyine 0,013 ila 0,03 litre.m-2.s-1 su uygulama hızlarını önerilmektedir. Long ve Garner (2004), bir tank yangınından rüzgar yönünde iki tank çapı uzaklıkta veya diğer yönlerde bir tank çapı mesafede bulunan tankların en az 0,03 litre.m-2.s-1 su püskürtme hızıyla korunması gerektiğini belirtmiştir. Bununla birlikte, NFPA 15, (2009) genellikle sıvılaştırılmış petrol gazı içeren basınçlı kaplara uygulanabilen 0,17 litre.m-2.s-1 su püskürtme hızını önermektedir, bu hız alev teması deneylerine dayanmaktadır. Tankların soğutulabileceği yöntemler aşağıdaki gibi özetlenebilir (Long ve Garner, 2004):

- Dış su spreyi (su püskürtme)
- İç su spreyi
- Su dolu bir radyant ısı soğutucu tabaka

- Serinletilmiş su tankının dış yüzeyine püskürtülmesi
- Serinletilmiş suyun tankın içine enjekte edilmesi
- Bu yöntemler, tank yangınlarına müdahale etmek ve tankların soğutulmasını sağlamak için kullanılan yaygın uygulamalardır.

#### **4.1.2. Su spre ve dökme sistemleri**

Bu yöntem, sabit çatılı depolama tankının dış duvarına ve çatısına su vermenin en etkili yoludur ve bunu gerçekleştirmenin iki temel yolu vardır:

a) Çatının yaklaşık 0,3 m yukarısında desteklenen konsantrik boru halkalarının kullanılması. Bu halkalara, çatının tamamını su ile kaplayacak şekilde örtüşen bir su püskürtme deseni oluşturan püskürtme nozülleri takılır. Duvar benzer şekilde korunur, genellikle duvarın üstünde ve duvardan yaklaşık 0,6 m uzaklıkta bir püskürtme halkası bulunur. Bu halkaya püskürtme nozülleri takılır ve su püskürtme halkası hafifçe aşağıya doğru açılır, böylece suyun çevreye yayılması ve duvardan aşağıya doğru akması sağlanır.

b) Dökme sistemi, tek bir su ana hattının tank çatısına yönlendirildiği ve suyun çatının üzerine dikey olarak aktarıldığı ve bir çıkış borusunun sonunda bulunan konik bir nozül veya çatı plakasına bağlı bir koronet aracılığıyla çatı üzerine eşit şekilde dağıtıldığı bir sistemdir. Su çatıdan aşağıya doğru akarken, suyun çatıya çarpmasıyla, suyu duvara yönlendiren sıçrama plakaları duvarın kenarına takılır: bu plakalar, su onlara çarptığında duvara yönlendirilir ve böylece duvardan aşağıya doğru akar.

Bu sistemler, yangın tespitini takiben elektrik, pnömatik veya hidrolik sistem tarafından otomatik olarak tetiklenen bir su dökme valfindan beslenebilir (Alimohammadi ve ark, 2015).

#### **4.1.3. Sabit ve römorklu su monitörleri**

Sabit ve römorklu su monitörleri, depolama tanklarını soğutmak için maliyet etkin bir yöntemdir ve bu tür monitörlerin sayısı, kapasitesi, konumu ve dağılımı, bireysel site gereksinimlerine bağlıdır. Ancak, su monitörlerinin kullanıma sokulması düşünülürken erişim sorunları ve yerel su kaynağı faktörleri dikkate alınmalıdır (Alimohammadi ve ark, 2015).

#### 4.1.4. Köpük sistemleri

Köpük yöntemleri, kabul edilebilir bir genel koruma düzeyi sağladığına inanıldığı için en yaygın kullanılan yangın söndürme sistemleridir.

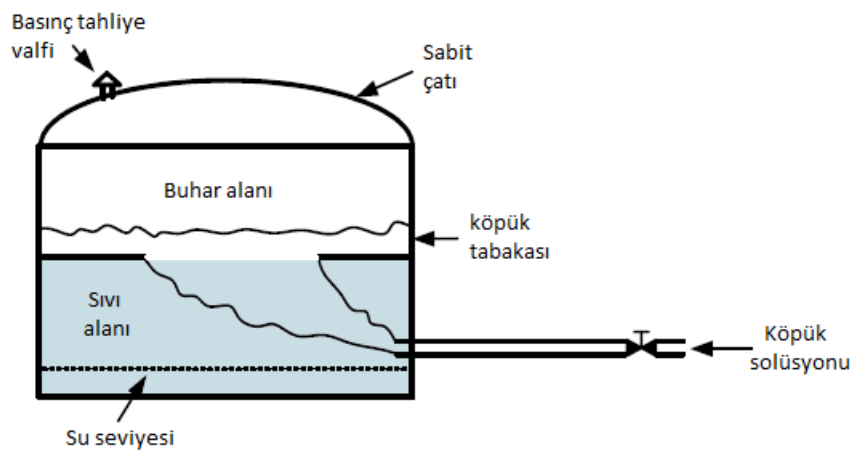
Köpük yangın söndürme sistemleri, yangın söndürme su hattına bir köpük yapıcı konsantre maddesinin eklenmesiyle çalışır. Bu, bir çözelti oluşturur ve bu çözelti bir köpük jeneratörüne beslenir ve elde edilen köpük yangına yönlendirilir. Sabit tavanlı, açık üstlü, yüzen tavanlı ve iç yüzen tavanlı depolama tankları için üç temel köpük sistemi bulunmaktadır: bunlar baz enjeksiyonu, üstten köpük dökme ve köpük monitörlerdir (Nolan, 2014).

#### 4.1.5. Taban enjeksiyon sistemleri

Taban enjeksiyon sistemleri, alt yüzey köpük enjeksiyon sistemleri olarak da bilinir ve alkol direnci gerektirmeyen ürünler dışında sıvı hidrokarbon içeren sabit-tavanlı tanklarda kullanım için uygundur.

Köpük depolama tankının tabanına, Şekil 3.1.'te gösterildiği gibi, alttaki su tabakasının üzerine enjekte edilir. Köpük depolanan ürünün içinden yükselir ve yüzeyde bir söndürme örtüsü oluşturur. Yükselen köpük, yanma yüzeyine soğuk ürün taşıyan dönme akımlarına neden olur ve yangını söndürmeye yardımcı olabilir.

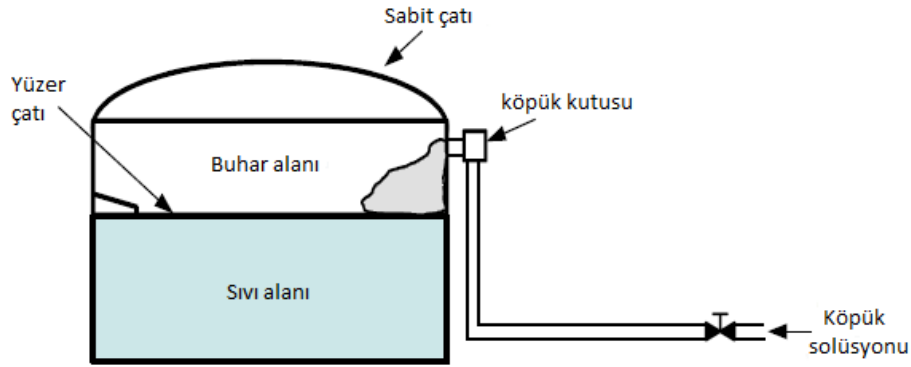
Taban enjeksiyonu, ürün kontaminasyonuna karşı yüksek dirence sahip köpükle mümkündür; ayrıca köpüğün iyi bir yanma geri dönüş direncine sahip olması gerekir. Bu tür bir sistem, gereken tüm bileşenlere sahip tamamen sabit veya çeşitli uygun bağlantılar kullanılarak yarı-sabit olabilir.



**Şekil 4.1.** Yangınla mücadele köpük bazlı enjeksiyon sistemi. Köpük, tankın tabanına enjekte edilir ve daha sonra yükselerek sıvının yüzeyini kaplar.

#### 4.1.6. Üst köpük dökme sistemleri

Üst köpük dökme sistemleri, sabit-tavanlı ve içte yüzen-tavanlı depolama tanklarını korumak için kullanılır. Her iki durumda da, sistemler, yangın riskinin depolanan ürünün toplam yüzey alanını içerdiği varsayımına dayanılarak tasarlanmıştır. Sistem, köpük yapma konsantresinin tank dışı alanında yangın söndürme su besleme hattına giriş yapılmasıyla çalışır. Bu hattın başına bir köpük üretici, köpük kutusu ve dökücü yerleştirilir, hepsi tank duvarının üstünde hizada yer alır (Şekil 3.1'de gösterildiği gibi). Başlatıldığında, köpük çözeltisi tanka yönlendirilir, burada köpük üretici çözeltiyi havalandırır ve köpüğü köpük kutusundaki bir patlama diskinden geçirerek oluşturulan köpüğü teslim eder. Köpük kutusuyla bağlantılı olan tank duvarının hemen iç kısmındaki bir dökücü ünite, köpüğü duvardan aşağıya yönlendirerek yangın sönen ürünü örten bir örtü oluşturur (NFPA, 2010).



Şekil 4.2. Yangın söndürme köpüğü üstten dökme sistemi

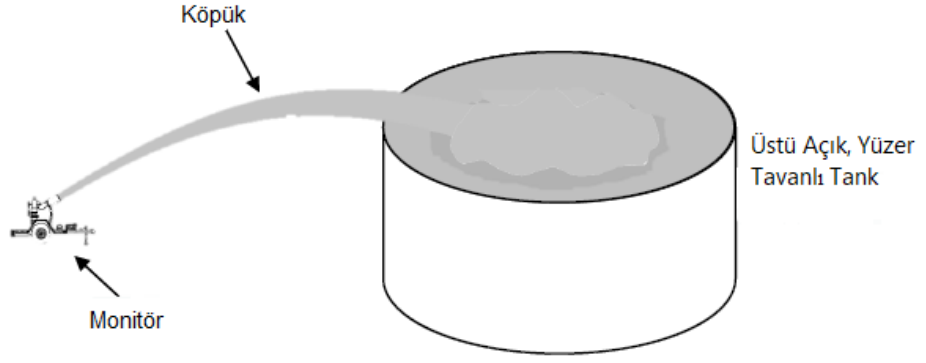
#### 4.1.7. Köpük monitörleri

Sabit ve treyler montajlı köpük monitörleri, tüm türlerdeki dikey depolama tanklarını korumak için uygundur ve performans sınırlamalarına tabi olsa da, 18 metre çapına kadar olan tanklar için birincil koruma sistemi olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, NFPA 11 gibi bazı mühendislik kodları, monitörlerin yaklaşık 20 metre çapından daha büyük tanklar için birincil saldırı yöntemi olarak kullanılmaması gerektiğini belirtmektedir. Köpük monitörleri genellikle ikincil bir sabit köpük sistemi olarak veya dökülmelerle mücadele etmek için daha uygun ve daha yaygın bir şekilde kurulurken, tank soğutma amacıyla da kullanılabilir.

Çoğu sistemde olduğu gibi, köpük monitörleri yerden yakın olacak ve üretilen köpüğün öncelikle tank duvarının üzerinden geçmesi gerekecektir. Bu gereklilik,



tankın yüksekliği, tanklar arasındaki mesafe, monitörün konumu ve hava koşulları gibi birçok faktör nedeniyle zor olabilir. şekil 3.2. köpük monitörünü göstermektedir.



**şekil 4.3.** Yanan tanktan uzağa yerleştirilebilen römorka monte köpük monitörü



## 5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) MODELLERİ

HAD modelleri, akışkan akımında kütle, momentum ve enerjinin korunumu hakkında kısmi diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözer ve yangın davranışını tahmin etmek için kullanılır. Modeller ayrıca yangınlarda meydana gelen kimyasal ve fiziksel süreçleri ifade eden alt modelleri de içermelidir. Bu nedenle, HAD modelleri matematiksel olarak karmaşıktır: çözüme ulaşmak için önemli bir süreye, yüksek seviyede bir Merkezi İşlem Birimi (CPU) gerektirir ve önemli düzeyde kullanıcı uzmanlığı gerektirir. Cowley ve Johnson (1992) tarafından belirtildiği gibi, HAD modelleri karmaşık geometrilere hava ve duman hareketini ve havalandırma sorunlarını tahmin etmede etkilidir, ancak mevcut deneysel modeller kadar etkili değildir ve alev konumunu ve ısıma ısı akısını tahmin etmede yeterli değildir. Ayrıca, Hume ve Eady (2002) tarafından da belirtildiği gibi, HAD modelleri, ısıma ısı akısını modellenmek için ideal değildir çünkü bu bir akışkan akısı değildir. Bununla birlikte, HAD modellerinin yangın modellenmesinde kullanımı, daha düşük maliyetlerle daha büyük bilgisayar işleme gücünün mevcudiyetiyle paralel olarak artmıştır.

Geçmişe kıyasla, HAD'nin sonuçları önemli ölçüde gelişmiştir. İşte HAD'nin sonuçlarının gelişimi hakkında bazı bilgiler:

**Hesaplama Kapasitesi:** Geçmişte, HAD simülasyonları için kullanılan bilgisayar sistemleri sınırlı hesaplama kapasitesine sahipti. Bu nedenle, daha karmaşık ve büyük ölçekli problemlerin çözümü zor olabilir veya imkansız olabilirdi. Ancak günümüzdeki hızlı bilgisayarlar ve gelişmiş paralel hesaplama teknikleri, daha büyük ve karmaşık sistemlerin modellenmesini ve daha kesin sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

**Sayısal Yöntemler:** HAD simülasyonlarında kullanılan sayısal yöntemler ve çözüm algoritmaları da önemli ölçüde gelişmiştir. Daha doğru sonuçlar elde etmek için daha kesin ve etkili sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, daha hassas türbülans modelleri ve akış düzenleme teknikleri kullanılarak, türbülanslı akışların daha iyi bir şekilde modellenmesi mümkün hale gelmiştir.

Paralel Hesaplama: HAD'nin gelişimiyle birlikte, paralel hesaplama teknikleri daha yaygın hale gelmiştir. Paralel hesaplama, büyük ve karmaşık problemlerin daha hızlı çözülmesini sağlayarak simülasyon sürelerini kısaltır. Bu da daha hızlı iterasyonlar ve daha kesin sonuçlar elde etme imkanı sağlar.

Grid Çözünürlüğü: HAD simülasyonlarında kullanılan grid çözünürlüğü de artmıştır. Daha ince grid yapıları kullanılarak, akış alanının daha ayrıntılı bir şekilde modellenmesi mümkün olmuştur. Bu, akışın detaylı bir şekilde incelenmesine ve daha doğru sonuçların elde edilmesine olanak tanır.

Doğruluk ve Güvenilirlik: Gelişmiş hesaplama teknikleri ve artan hesaplama kapasitesi, HAD'nin sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmıştır. Daha hassas türbülans modelleri, daha doğru sınır koşulları ve daha iyi sayısal algoritmalar sayesinde, gerçek dünya akış olaylarının daha iyi bir şekilde simüle edilmesi mümkün olmuştur.

Sonuç olarak, HAD'nin gelişimiyle birlikte, daha karmaşık problemlerin modellenmesi ve daha kesin sonuçların elde edilmesi mümkün hale gelmiştir.

Bu giriş bölümünde, ham petrol depolama tankı çiftliklerinin küresel ekonomik gelişme açısından büyük öneme sahip olduğu belirtilmektedir. Ancak, bir petrol tankında yangın çıkma riski daha az olsa da, yangıcı tanklardan kaynaklanabilecek yangınların neden olabileceği felaketler göz önüne alınmalıdır. Örneğin, radyasyon, yakındaki bir tankın katı duvarını zayıflatacak ve diğer tanklardaki petrolü ateşleyerek daha ciddi bir kaza meydana getirecektir. Son yıllarda dünyada birkaç büyük ölçekli petrol tankı yangını meydana gelmiş ve iki veya daha fazla bitişik tank yanmıştır. Bu durum büyük ekonomik kayıplara ve çevreye büyük zararlara yol açmıştır. Bu nedenle, yangın söndürme ekiplerinin ana hedeflerinden biri, yangının bitişik tanklara yayılmasını engellemektir.

Havuz yangınlarını değerlendirmek için iki ana matematiksel model olan dinamik hesaplamalı akış modeli ve mühendislik modeli bulunmaktadır. Tek Nokta Kaynak modeli ve Katı Alev modeli (SFM) ise başlıca mühendislik modelleridir. İlk model, alevin tek bir ısı kaynağı olduğu varsayımına dayanır ve ısı ışıınının yoğunluğunun ters kare ile mesafe ile değiştiğini varsayar, bu da alevden yaklaşık olarak beş havuz çapı uzaklığından öteye kadar ışıının ısı akısını tahmin eder. Katı alev modelinde (Lautkaski, 1992), rüzgarın yangın davranışı üzerindeki etkisi, silindirik bir şekil

seçilerek incelenir. Bu silindirik şekil, alevi temsil eder. Ardından, bu silindirik şeklin uygun boyutları belirlenir. Ancak, bu iki modelin ilerlemiş türbülans modelini katmanlandıramamaları nedeniyle önceden belirlenmiş vortex aralığındaki havuz yangını dinamiğini etkin bir şekilde simüle etme konusunda kısıtlamaları vardır. Ayrıca, bu modeller, rüzgarda alevin eğimine bağlı farklı senaryoları izlemek veya büyük ölçekli yangın olaylarının tam yanması özelliklerini tahmin etmek için geçerli değildir.

Ham petrol yangınlarını modellemek önemi artmaktadır, çünkü büyük ölçekli yangın testleriyle ilgili temel zorluklar vardır. Yüksek zaman doğruluğuna sahip FDS simülasyonu, yangın analizi için geçerli varsayımlar ve sınırlayıcı koşullar sağlar. Hızlı bilgisayar teknolojisi ilerlemesiyle birlikte çalıştırılması daha kolay hale gelmiştir, bu da doğru sonuçlara sahip yangın bilgisayar kodlarının geliştirilmesine yansımaktadır. Bu tür modeller, ham petrol tankı yangınlarını incelemek için bazı araştırmalarda kullanılmaktadır.

Bu bölümde belirtilen çalışmalardan bazıları şunlardır:

Sun ve ark. (2014), LNG tesisi için havuz risk analizi için HAD modelinin yaygın olarak kullanılan mühendislik modelinden daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemiştir.

Wang ve ark. (2013), havuz yangını ortamında ham petrol rezerv tabanının yanıcıya yakın tanklarda termal radyasyon etkisini simüle etmek için fluent yazılımını kullanan bir sayısal model gerçekleştirdi.

Miao ve ark. (2014), Çin'deki bir kimya işletmesinin petrokimya tank bölgesindeki riskleri incelemek için HAD simülasyon modeli tasarladı.

Sun ve ark. (2015), bir LNG istasyonu için tehlike analizi yapmak için HAD kullanarak sayısal bir modeli inceledi.

Juuly ve ark. (2015), rüzgar hızına göre incelenen bir HAD modeli geliştirdi ve yanıcı tanklarda Domino Etkisi'ni araştırdı.

Siddapureddy ve Prabhu (2017), 0.3 m ve 0.5 m çaplı havuz yangınlarının parametrelerini analiz etti ve FDS'nin tahmini parlaklık yoğunluğu ve merkez hattı sıcaklığı doğrulamak için kullanıldı.

Loy ve ark. (2018), 15 m çapındaki bir LNG havuzunda bir yangın senaryosunu entegre etmek için FDS'yi kullandı.

Ahmadi ve ark. (2019), tank çiftliklerinde tank ve hendek havuz yangınlarının sayısal simülasyonunu FDS kullanarak gerçekleştirdi.

Sharma ve Mishra (2019), depolama tankı yangınlarının en yüksek yanma hızını değerlendirmek için deneysel bir kurulumu yaptılar.

Yang ve ark. (2020), kaynatma olayının sonuçlarını tahmin etmek için hem hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hem de deneysel ilişkileri kullanmışlardır. havuz yangını tarafından neden olunan büyüme vektörünü simüle etmek için katı alev modellerini ve HAD'yi uygulamışlardır.

Bu çalışmalar, ham petrol depolama tankı yangınlarıyla ilgili riskleri ve yangın davranışını anlamak için matematiksel modellerin ve HAD simülasyonlarının etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

### **5.1. Amaçlar**

Uzmanların bilgisine göre, yukarıda bahsedilen çalışmalardan hiçbiri, radyasyon ısı akısının etkisiyle yanıcı tank yangınları üzerinde önemli bir etkiye sahip olan sıcaklık konturlarını ele almamıştır. Büyük ham petrol çiftlikleri için yeni bir sıcaklık ve radyasyon simülasyonu tartışılmıştır. Büyük kapasiteli petrol tanklarında gerçek bir yangın simülasyonu gerçekleştirmek zor veya hatta imkansızdır. Sıcaklık/duman haritalaması için çeşitli enstrümantasyonlar kullanılmalıdır, ancak bunlar pahalıdır ve deneyler kolayca gerçekleştirilemez. Bu nedenle, farklı yangın senaryolarını incelemek, sıcaklık ölçmek ve yangın çevresindeki duman yolunu izlemek için dijital bir simülasyon modeli kullanmak tek yaklaşımdır. Öte yandan, sayısal simülasyon, zamana bağlı çözümlerle birlikte büyük sayıda mesh gerektirdiği için özel bilgisayar işlemcilerine ihtiyaç duyar. Mevcut model, değişken hava koşulları altında yangın fiziksel/kimyasal süreçlerini ifade eden alt modeller içerir. Karmaşık bir büyük ölçekli modeli simüle eder ve yüksek düzeyde bir CPU'ya sahip bir süper bilgisayarı gerektirir. Bununla birlikte, çözüme ulaşmak için minimal süre gerektirir ve önceki uygulanamayan geniş bir toplumda kullanılabilir. Ayrıca, daha önce çalışılmamış olan kendi sıcaklığıyla birlikte bir duman izi de takip edilmiştir. Bu, itfaiyecilerin yangın söndürme sürecindeki konumunu belirlemede önemli bir etkiye sahiptir. Aynı zamanda çevresel açıdan da önemli bir etkiye sahiptir. Mısır'daki en büyük tank çiftliklerinden biri olan SUMED çiftliği, büyük ham petrol depolama tanklarında yangın çıkma potansiyelini ve tankların çevresindeki duman sıcaklık dağılımını

tahmin etmek için bir vaka çalışmasında kullanılmaktadır. Bu büyük ölçekli çiftlik için benzer bir sıcaklık ve radyasyon çalışması daha önce yapılmamıştır. Ayrıca, bir duman izi de takip edilmektedir. Fire Dynamics Simulator (FDS), tank çiftliğinde havuz yangınlarını simüle etmek ve sıcaklık artışı ve alev/duman sıcaklık konturlarının davranışını incelemek için kullanılmaktadır. Çalışma ayrıca tahmin edilen ısı akısını da tartışmaktadır. Bu model, farklı rüzgar hızı ve yönde farklı yangın senaryolarını tahmin etme kapasitesine sahiptir, bu da güvenli çalışan tank çiftlikleri tesislerinin tasarımı ve inşasına doğrudan katkıda bulunur.

## **5.2. Tank Yangını Deneysel Çalışması**

Havuz yangınlarından gelen radyant ısı akısı deneysel çalışmalar sırasında ölçülebilir ve bu ölçümler matematiksel havuz yangını modellerini doğrulamak için kullanılabilir. Ancak, hava koşullarının ve çeşitli yakıt türlerinin güçlü etkisi nedeniyle, güvenilir modelleme sonuçları elde etmek zordur. Bu nedenle, farklı atmosfer koşullarında ve çeşitli yakıt türleri kullanılarak havuz yangınının sonuçlarıyla ilgili verilerin toplanması için deneysel çalışmalar yapılması gerekmektedir.

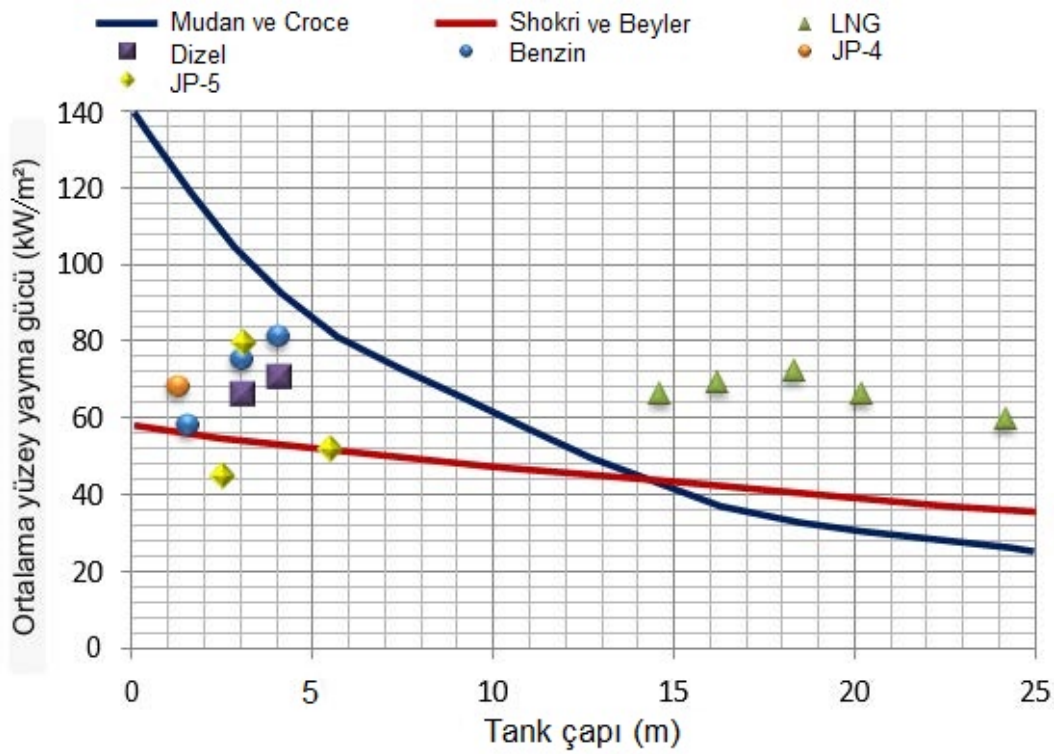
Farklı büyüklükteki havuz yangınlarının yaydığı radyant ısı miktarı, Bu rapor benzinin havuz yangını verilerini verir ve havuz yangını boyutuna göre ayrı ayrı gruplandırılır. Aşağıdaki tablo, benzin havuzu yangınlarından kaynaklanan ısı akısının deneysel verilerini göstermektedir.

Bu deneylerde elde edilen veriler, havuz yangını dinamiklerini daha iyi anlamamıza ve yangın güvenliği değerlendirmeleri için daha doğru ve güvenilir modelleme tekniklerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Bu çalışmada, havuz yangını üzerinde yapılan Ortalama yayma gücü (E) ve Radyant Isı akısı deneylerinin özeti sunulmuştur.

**Tablo 5.1.** Benzin Havuz Yangını Üzerinde Yapılan yayma gücü (E) ve Radyant Isı akısı Deneyi

| Yangın<br>çapı D<br>(m) | Radyant<br>Isı akısı<br>(kW/m <sup>2</sup> ) | Yanma<br>oranı<br>(kg/m <sup>2</sup> s) | Ortalama<br>yayma gücü E<br>(kW/m <sup>2</sup> ) | Ref.                   |
|-------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|
| 1.5                     | 1.4                                          | 0.07                                    | 59.23                                            | Muñoz ve ark. (2004)   |
| 3                       | 1.55                                         | 0.077                                   | 76.24                                            | Muñoz ve ark. (2004)   |
| 3                       | 1.9                                          | 4.8                                     |                                                  | Yumoto. (1971)         |
| 4                       | 1.4                                          | 0.082                                   | 81.76                                            | Muñoz ve ark. (2004)   |
| 5.4                     | 0.94                                         | 4.6~6.5                                 |                                                  | Hiroshi ve ark. (1988) |
| 6                       | 1.1                                          |                                         |                                                  | Mudan. (1984)          |



**Şekil 5.1.** Bazı Deneylerin Sonuçları

### 5.2.1. Tank yangın senaryosu

Bu senaryoda, üç model tasarlanmıştır, birinci modelin tank çapı 1,5 metre, ikinci model 3 metre ve üçüncü model 4 metredir.

Küçük depolar aşağıdaki kriterlere göre belirlenen minimum ayrılma mesafesiyle birbirinden ayrılmış olarak kabul edilmektedir. Bu mesafe, endüstri tarafından kabul edilen iyi bir uygulama olarak kabul edilmekte ve geniş çapta kabul görmektedir. Bu



senaryo için küçük tanklar, Petrol Enstitüsü Model Kod Güvenli Uygulama (1981) tarafından  $\leq 10\text{m}$  çaplı tanklar olarak kabul edilmektedir.

Küçük tanklar gruplar halinde bir araya getirilebilir. Grubun toplam kapasitesi, Petrol Enstitüsü Model Kod Güvenli Uygulama (1981) tarafından belirlenen şekilde  $8000\text{m}^3$ 'ü geçmemelidir. Bir grup içindeki bir tankı içeren ciddi bir yangın durumunda, böyle tank ayrılma mesafeleri, komşu tankların zarar görmesini veya hatta yok olmasını önlemeyecektir. Ancak, acil prosedürlerin uygulanması ve olayla tehdit edilen bölgelerden insanların tahliye edilmesi için yeterli süre sağlamaları gerekmektedir.

### **5.2.2. Sayısal simülasyon**

#### **5.2.2.1. Yangın dinamiği simülatörü**

Yangın modelleri genellikle iki tip kullanılır: deneysel model ve HAD modeli. Deneysel yangın modelleri genellikle yangın mühendisleri tarafından kullanılır. Popülerlikleri, genel yangın koşulları için hızlı ve yeterli bir şekilde doğru tahminler sağlama yeteneklerine dayanmaktadır. Bununla birlikte, yangın modellemesi şu anda bir gelişim sürecinden geçmektedir. Ayrıca, daha büyük hesaplama gücü, HAD modellerinin yangın araştırmalarında giderek daha uygulanabilir bir seçenek haline gelmesini sağlamıştır.

Son dönem yangın modeli gelişmelerinin başında FDS gelmektedir. FDS, yangınlardan yayılan duman ve ısıya odaklanan düşük hızlı ve termal olarak sürünen akış için uygun kısmi diferansiyel denklemler biçimini uygulayan bir HAD modelidir. Denklemlerin formülasyonu ve sayısal algoritmaları, Fire Dynamics Simulator McGrattan ve ark. (2019) adlı makalede açıklanmıştır. FDS, HAD'nin Large Eddy Simulation (LES) veya Direct Numerical Simulation (DNS) tekniklerini kullanarak akışla ilgili kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için kullanır. LES, DNS ve RANS gibi diğer HAD tekniklerinden farklıdır. LES, büyük ölçekli alanlardaki türbülanslı akısı açıkça hesaplar. Ancak LES tekniği hesaplama açısından yoğundur. Büyük ölçekli hesaplama alanlarında hızlı türbülanslı akısı çözebilmek için gereken yüksek ağ çözünürlüğü, LES tekniğinin güçlü bir bilgisayar ve büyük bir Rastgele-Erişim Belleği (RAM) gerektirmesine neden olur. Bu araştırmada, birçok deneme yapmak için büyük RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

### 5.2.2.2. Hidrodinamik modeli

FDS'deki ana alt model olarak hidrodinamik modelde yürütülen kısmi diferansiyel denklemler (Navier-Stokes denklemleri), kütle transferi, momentum ve enerji gibi akışkan özelliklerini tanımlar. Navier-Stokes denklemlerini tasvir eden modeller, akustik dalgaları filtreleyerek düşük Mach sayılı denklemleri elde etmek için basitleştirilmiş ve termal olarak genişlebilen çok bileşenli akışkan içeren akısı içerir. Bu denklemler, yangın olaylarında meydana gelen yoğunluk ve sıcaklıkta yüksek çeşitliliğe ve basınçta küçük değişimlere izin veren kimyasal ısı salınımı ve taşıyıcılık kuvvetleri tarafından oluşturulan düşük hızlı gaz hareketini tasvir eder (McGrattan ve ark, 2019). FDS tarafından çözülen kütle, momentum ve enerjinin korunumu için konuşma denklemleri aşağıda sunulmuştur:

Kütle korunumu:

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (5.1)$$

Momentumun korunumu:

$$\partial (\rho \mathbf{u}) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (5.2)$$

Enerjinin korunumu:

$$\partial (\rho h) / \partial t + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = Dp/Dt + \dot{R}a''' - \nabla \cdot R_a + \Phi \quad (5.3)$$

Bir ideal gaz için gaz durumu denklemi:

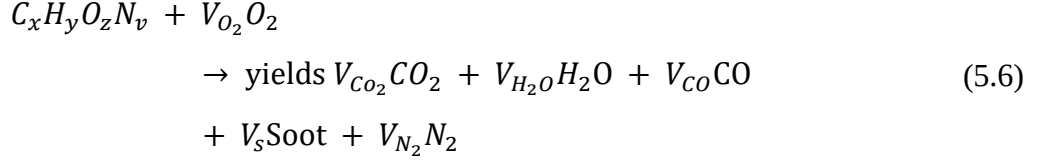
$$p = \rho R_u T / M \quad (5.4)$$

Kütle koruma denklemi:

$$\partial \rho_i / \partial t + \nabla \cdot (\rho_i \mathbf{u}) = \nabla \cdot (D_i \nabla Y_i) + \dot{m}_i''' \quad (5.5)$$

### 5.2.2.3. Yanma modeli

FDS teknikleri, yanma sürecini modellemek için kullanılan hesaplamalı alanın önceden tanımlanan boyutundan etkilenir. FDS'deki basit kimya modeli için, her reaksiyon aşağıdaki formda kabul edilir:



Bu çalışma için LES (Büyük Eddy Simülasyonu) daha uygun olacaktır, çünkü bir karışım-fraksiyonu tabanlı model kullanarak yakıt ve oksijenin difüzyonunu hesaplamak için kafes yeterince ince değildir (McGrattan ve ark, 2019). Alanın belirli bir noktasındaki gaz fraksiyonu, yakıt olarak ortaya çıkanın aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$z = YF - (Y_0 - Y_0^\infty) / (sY_F^I + Y_0^\infty) \quad (5.7)$$

$$s = V_0 M_0 / (V_F M_F) \quad (5.8)$$

Bu ifadeler, yanma sürecini modellemek için FDS'de kullanılan yaklaşımları ve LES yönteminin tercih edilmesini özetlemektedir.

Karışım fraksiyonu (mixture fraction)  $Z$ , yalnızca yakıt içeren bölgelerde  $Z = 1$ 'den, yalnızca ortam havası ve tükenmemiş oksijenin bulunduğu bölgelere (yangından uzak bölgeler)  $Z = 0$ 'a kadar değişir. Bu modelde, yanmanın karışım kontrolünde olduğu ve yakıt ve oksijen reaksiyonunun sonsuz hızda gerçekleştiği varsayılır. Ana reaktant/ürünlerin kütle fraksiyonları "durum ilişkileri" aracılığıyla karışım fraksiyonundan türetilir. Bu durum ilişkileri, basitleştirilmiş analiz/ölçümlerle elde edilen deneysel bir ifadedir.

### 5.2.2.4. Radyasyon taşıma modeli

Modelde ışınsal ısı akısı, saçılmayan gri gaz için ışınsal ısı transfer denklemi çözülerek dahil edilir. Radyasyon Transfer Denklemi (RTD), Sonlu Hacim Yöntemi (SHY) kullanılarak çözülür. Havuz yangını modellemesi, konvektif taşınım için kullanılan

sonlu hacim yöntemlerine benzer şekilde gerçekleştirilir. Çözümde 100 ayrık açı kullanılmaktadır (McGrattan ve ark, 2019). Isıl ışımanın enerji denklemindeki net katkısı şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned}\dot{R}_{ar}''' &= -\nabla \cdot \dot{R}_{ar}''(x) = k(x) [U(x) - 4\pi I_b(x)] ; U(x) \\ &= \int_{4\pi} I(x, s') ds'\end{aligned}\quad (5.9)$$

Burada  $k(x)$ , absorpsiyon katsayısı;  $I_b(x)$ , kaynak terimi; ve  $I(x, s)$ , saçılmayan gri gaz için Radyasyon Taşıma Denklemi (RTD) çözümüdür.

$$s \cdot \nabla I(x, s) = k(x) [I_b(x) - I(x, s)] \quad (5.10)$$

Pratik simülasyonlarda  $I$ ,  $I_b$  ve  $k$ 'nin spektral bağımlılığı kesin bir şekilde çözülemez. Tipik olmayan gerçek yakıtlar hakkında güvenilir veriler mevcut değildir. FDS, radyasyon spektrumunu nispeten az sayıda bant halinde bölebilir ve her bant için ayrı bir RTD çözebilir, ancak her zaman gerekli değildir. Gerçek yangınlarda, is ve termal ışıma boşlukları baskın kaynaklardır ve dalga boyuna karşı özellikle duyarlı değillerdir. Ortalama absorpsiyon katsayısı  $k$ , tür bileşimi/sıcaklığına bağlı bir fonksiyondur.

### 5.2.3. Tank yangını modellenmesi

Model, bir tank yangınından kaynaklanan Radyant Isı akısını ve yayma gücünü tahmin eder.

#### 5.2.3.1. Model girdileri

Model, yangın tankının içeriğinin özelliklerini, yangın tankının ve yakındaki tankların boyutlarını, ortam sıcaklığını, rüzgâr hızını, rüzgâr yönünü ve bağıl nemini gerektirir. Yakıtın türü verildiğinde, ilgili yakıt özellik işlevine erişilecek ve kütleli yanma hızı hesaplanacaktır.

Modelin girdisi aşağıdaki Tablo 'da özetlenmiştir:

**Tablo 5.2.** Model Girdileri

| Model               | 1      | 2      | 3      |
|---------------------|--------|--------|--------|
| Tank Çapı ( m )     | 1,5    | 3      | 4      |
| Tank yüksekliği (m) | 1,05   | 2,1    | 2,8    |
| Yakıt               | Benzin | Benzin | Benzin |

Benzin için girdiler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir;

**Tablo 5.3.** Benzin girdileri

|                                                           |                                |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Yanma ısısı ( kJ.kg <sup>-1</sup> )                       | 43700                          |
| Yayılan ısı fraksiyonu                                    | 0,46                           |
| Yakıttan ısı fraksiyonu                                   | 0,03                           |
| Karbon monoksitin yakıttan fraksiyonu                     | 0,01                           |
| Termal iletkenlik ( W.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 0,12                           |
| Yoğunluk ( kg.m <sup>-3</sup> )                           | 680                            |
| Spesifik ısı ( kJ.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )      | 2,22                           |
| Kütle Yanma Oranı (kg.m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )   | 0.055 , 0.083                  |
| Opaklık oranı                                             | 0.3                            |
| Yakıt kimyasal formülü                                    | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> |

Yangın Dinamiği Simülatörün'de kullanılan katı yapıların fiziksel ve termal özelliklerini aşağıdaki tabloda özetlenmiştir;

**Tablo 5.4.** Katı yapıların fiziksel ve termal özellikleri

| çelik pan                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------|------|
| Thermal conductivity ( $\text{W.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) | 45,8 |
| Spesifik ısı ( $\text{kJ.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )        | 0,46 |
| Yoğunluk ( $\text{kg.m}^{-3}$ )                           | 7850 |
| emisivite                                                 | 0,9  |
| beton zemin                                               |      |
| Thermal conductivity ( $\text{W.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) | 1,2  |
| Spesifik ısı ( $\text{kJ.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )        | 0,88 |
| Yoğunluk ( $\text{kg.m}^{-3}$ )                           | 2200 |

Değerler ve parametreler (Hurley ve ark, 2015) 'e göre çıkarıldı.

### 5.2.3.2. Atmosferik koşulların tanımlanması

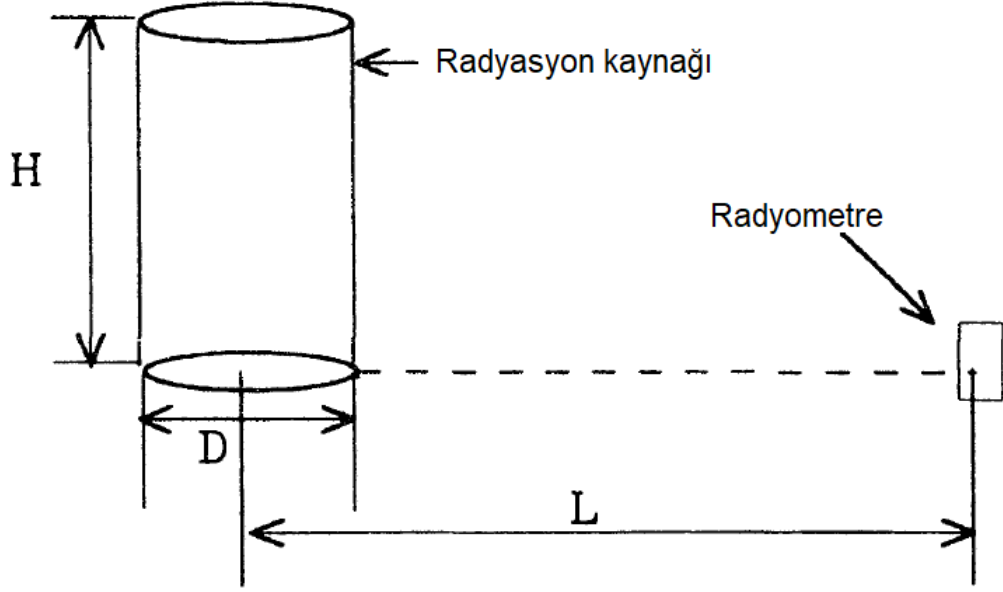
**Tablo 5.5.** Yangın Dinamiği Simülatöründe kullanılan atmosferik koşulları;

| Parametre       | Değer                  |
|-----------------|------------------------|
| Rüzgar hızı     | $1.6 \text{ m.s}^{-1}$ |
| Rüzgar yönü     | $180^\circ$            |
| ortam sıcaklığı | $20^\circ\text{C}$     |
| Nem             | 40%                    |

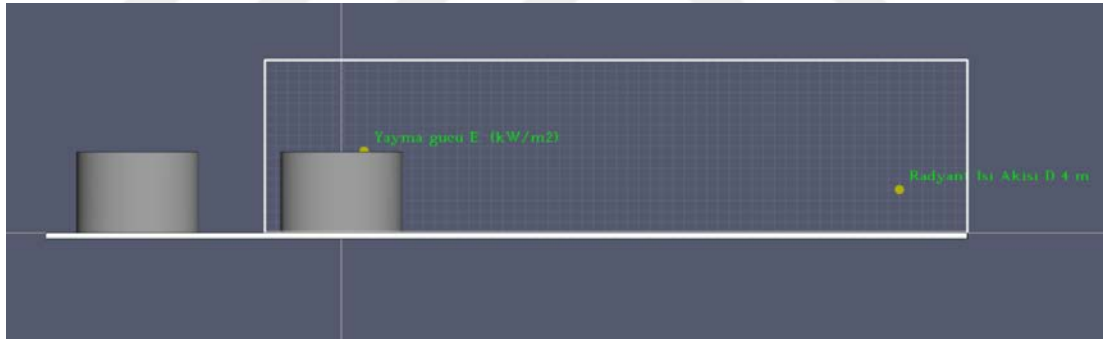
### 5.2.3.3. Radyometreler ve ölçüm noktaları

Her tank için radyometreler,  $L/D=5\text{m}$  konumuna yerleştirildi, Çapı 1,5 m olan tank için radyometrenin tankın merkezine uzaklığı 7,5 m'dir, Çapı 3 m olan tank için radyometrenin tankın merkezine uzaklığı 15 m'dir ve Çapı 4 m olan tank için radyometrenin tankın merkezine uzaklığı 20 m'dir. D tankın çapını, L tankın merkezi ile radyometre arasındaki yatay mesafeyi, H ise radyometrenin yerden yüksekliğini ifade eder. Radyometrenin yerden yüksekliği, biri tank yüksekliğinin yarısı, diğeri tank yüksekliğinin dörtte biri olmak üzere iki senaryoya göre ayarlandı.

yayma gücü radyometrelerine gelince, tüm radyometreler doğrudan yangın yüzeyinin üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.2.  $L/D=5m$ 'de yangın kaynağından radyometre mesafesi



Şekil 5.3. 4 metre çaplı bir tank için radyant ısı akısını ölçmek için radyometrenin 20 metre mesafeden yerleştirildiği ve aynı zamanda yayma gücünü ölçmek için radyometrenin yangının yüzeyine yerleştirildiği, FDS simülâtöründen alınan bir görüntü

#### 5.2.3.4. Mesh çalışması

FDS benzetim sonuçları, seçilen gridin boyutuna duyarlıdır (McGrattan ve ark, 2013b). İnce bir grid LES (Büyük Eddy Simülasyonu) benzetiminin doğruluğunu artırabilir, ancak hesaplama süresini ve maliyetini artırır. Nominal grid boyutu  $d_x$ , karakteristik ateş çapı  $D^*$ 'ye dayanır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$D^* = (\dot{Q} / (\rho_{\infty} C_p T_{\infty} * \sqrt{g}))^{2/5} \quad (5.11)$$

Burada  $C_p$ , özgül ısıdır ve  $\dot{Q}$  ısı salınım hızını temsil eder. Gridin çözünürlük değeri  $R = D^*/d_x$ , 4 ile 16 arasında uygun bir değerdir. Eğer  $R$  değeri 4 ile 16 arasındaysa, sonuçlar yalnızca tatmin edici doğruluk sağlamakla kalmaz, aynı zamanda makul bir hesaplama süresine de yol açar. Ancak,  $R$  değeri 4'ten küçükse, elde edilecek sonuçların olumsuz olduğu tespit edilir,  $R$  değeri 16'dan büyükse, hesaplama süresinde artışa neden olur (Mandloi ve Lilley, 2011) (McGrattan ve ark, 2013b).

Çalışmada 0,33 m'lik bir ağ boyutu kullanılmıştır.

#### 5.2.3.5. FDS tank yangın simülasyonu

Hesaplama alanının boyutları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir;

**Tablo 5.6. Alan Boyutları**

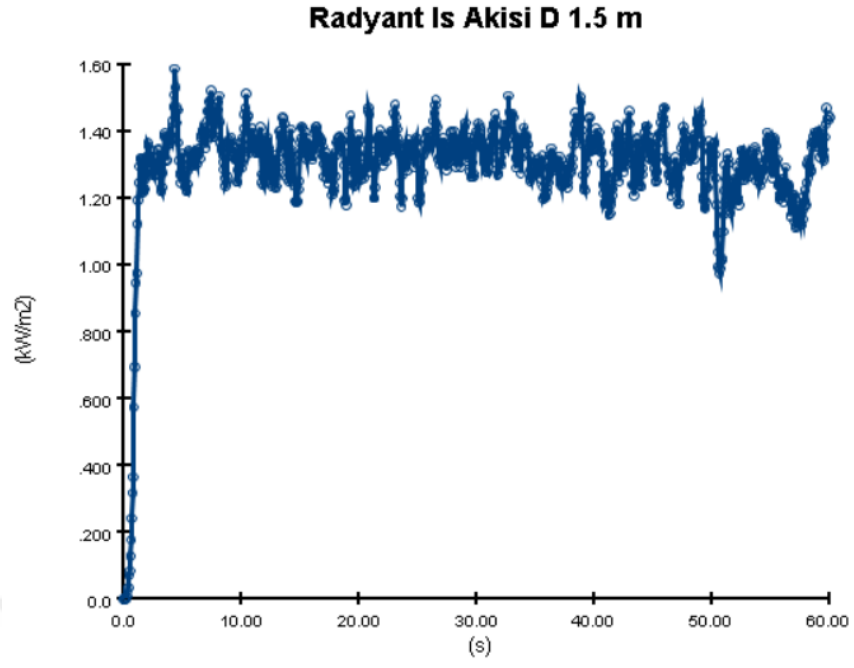
| Model      | 1<br>(1,5 m) | 2<br>(3 m) | 3<br>(4 m) |
|------------|--------------|------------|------------|
| X yönünde  | 2,4          | 4          | 5          |
| Y yönünde  | 9            | 17,5       | 23         |
| Z yönünde  | 3            | 5          | 6          |
| Cell hacmi | 0,33         | 0,33       | 0,33       |

Altı alan sınırından beşi atmosfere açık, zemin sınırı beton zemin olarak ayarlandı.

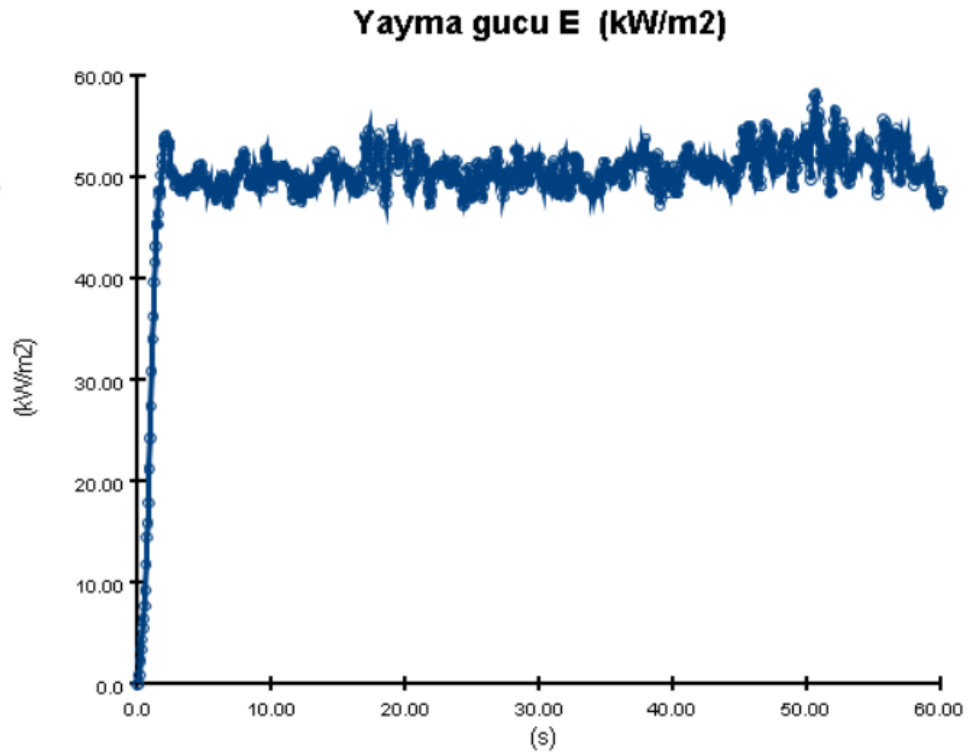
#### 5.3.3.6. Model çıktıları

Aşağıdaki şekillerde, üç modelin aldığı sonuçlar gösterilmektedir.

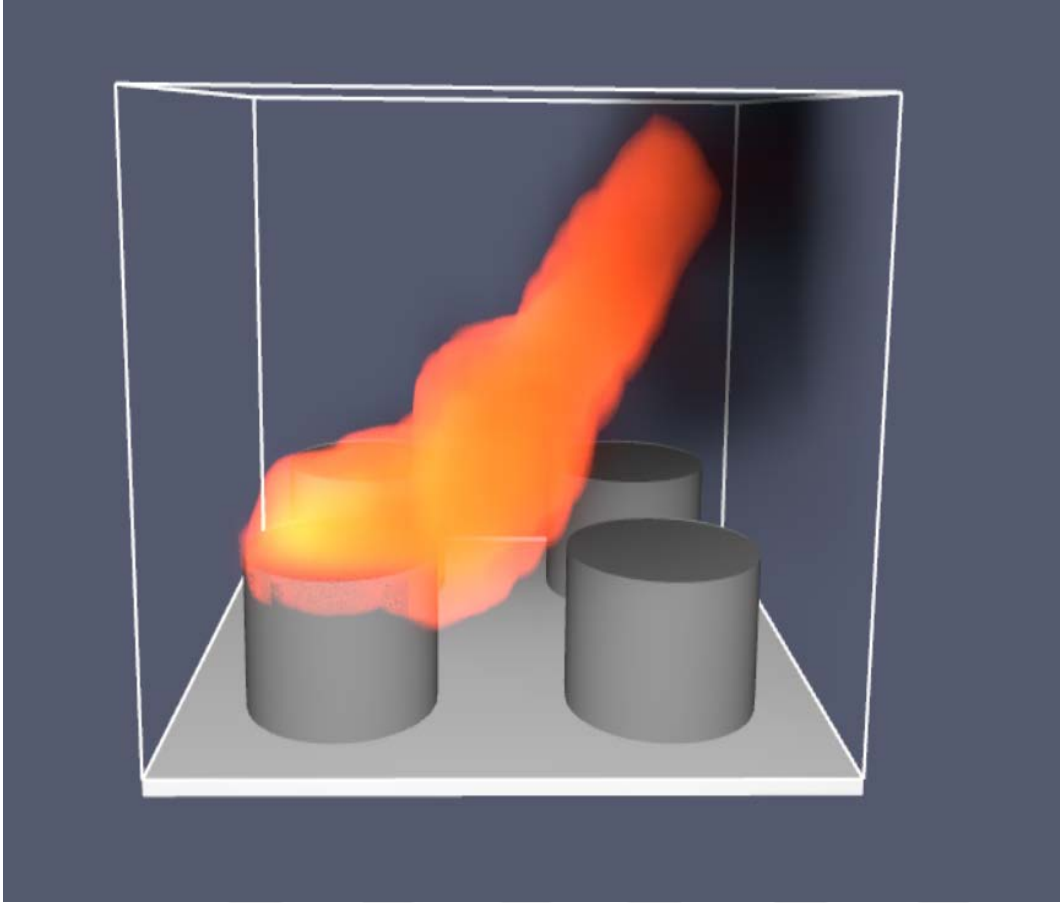




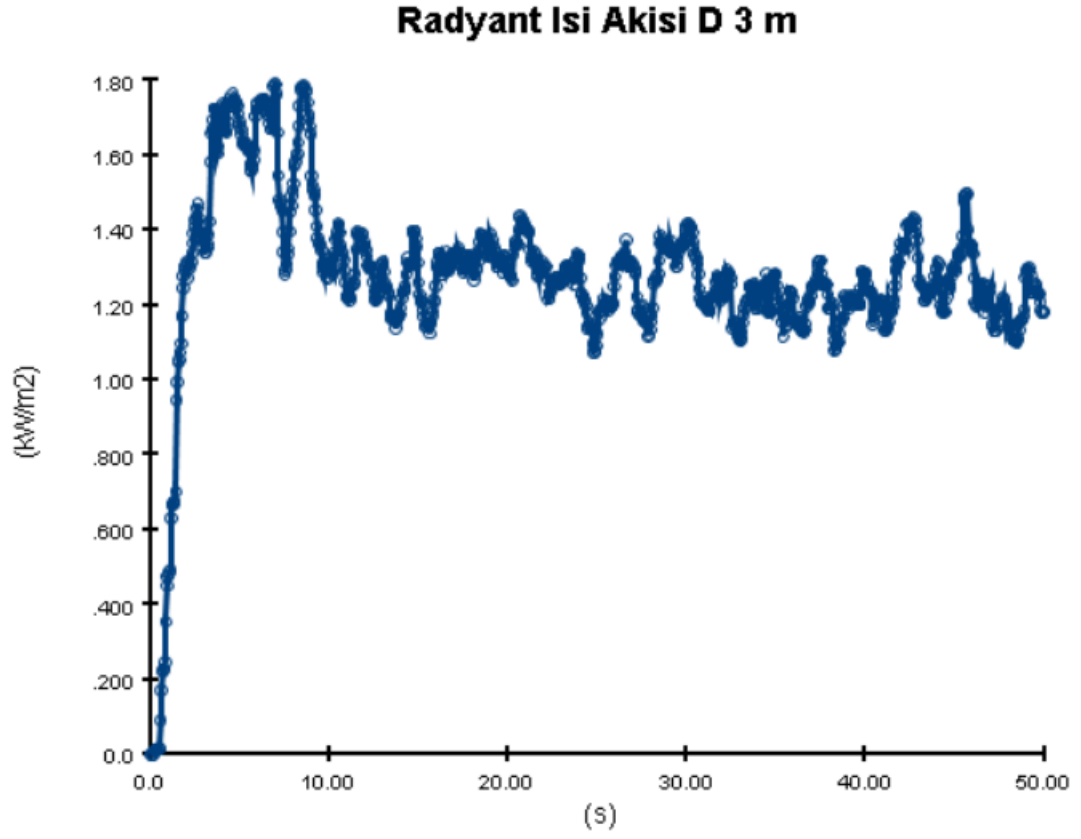
Şekil 5.4. Birinci deneyin (1,5 m) Radyant Isı Akısı sonuçları



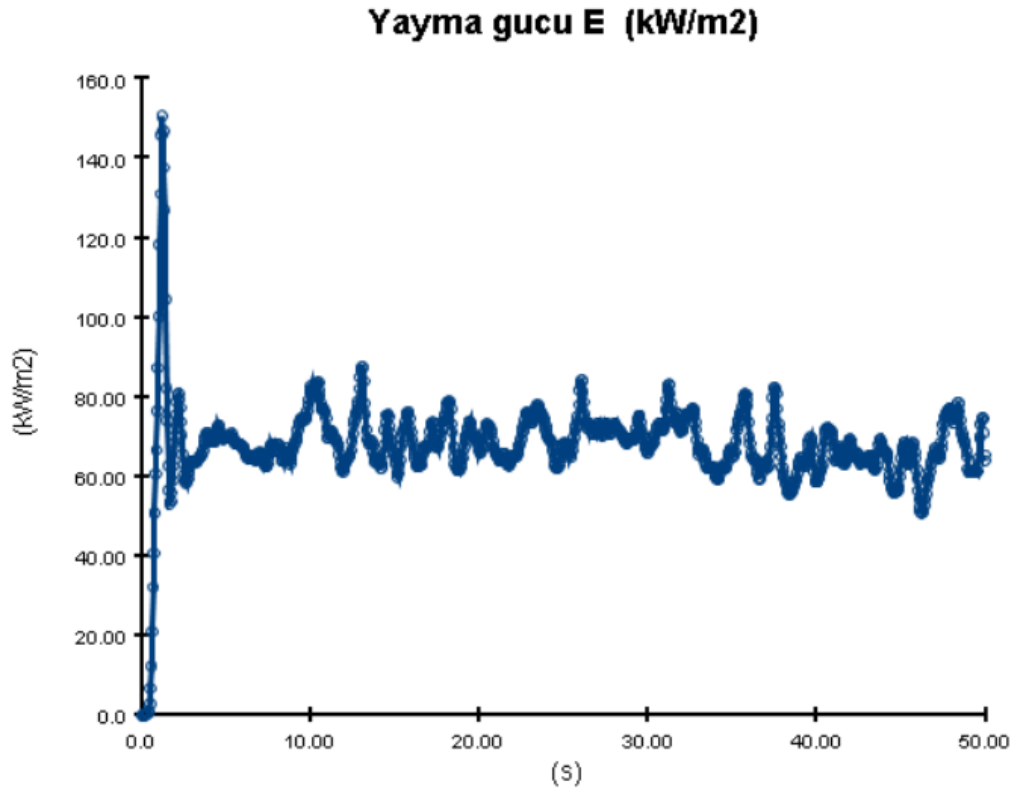
Şekil 5.5. Birinci deneyin (1,5 m) Yayma Gücü sonuçları



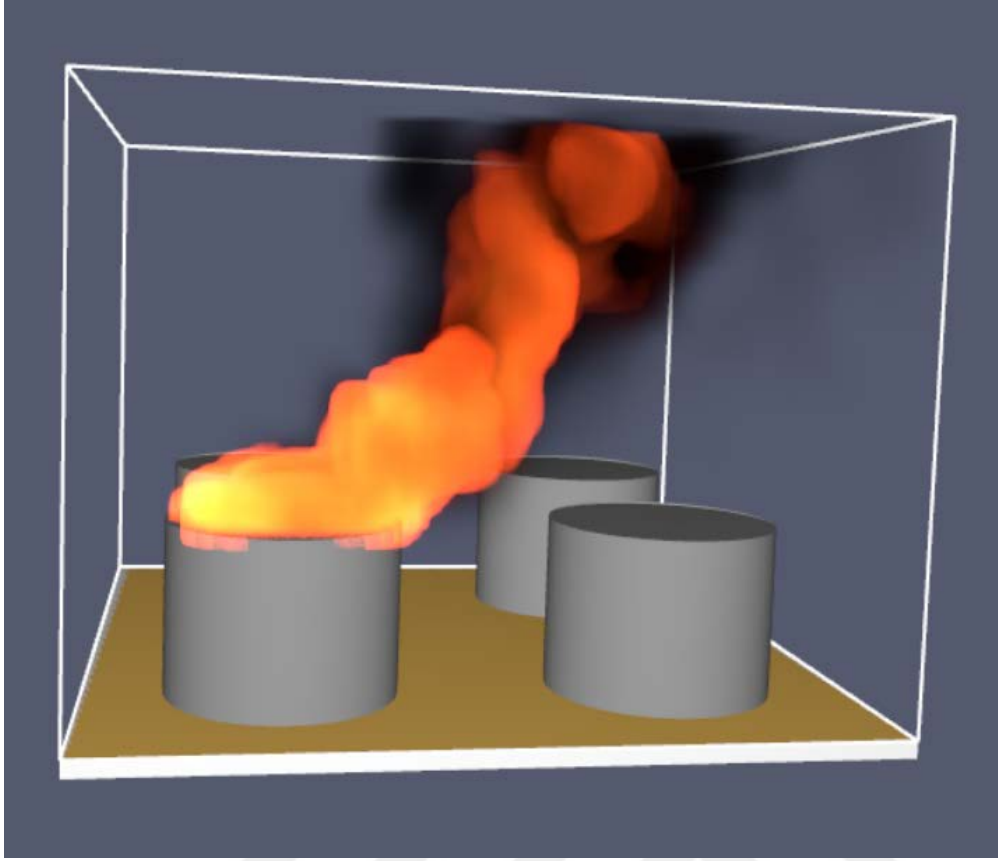
**Şekil 5.6.** 1,5 m çaplı tank için FDS simülasyonunda tahmin edilen benzin alevi şeklini gösteren görüntü-



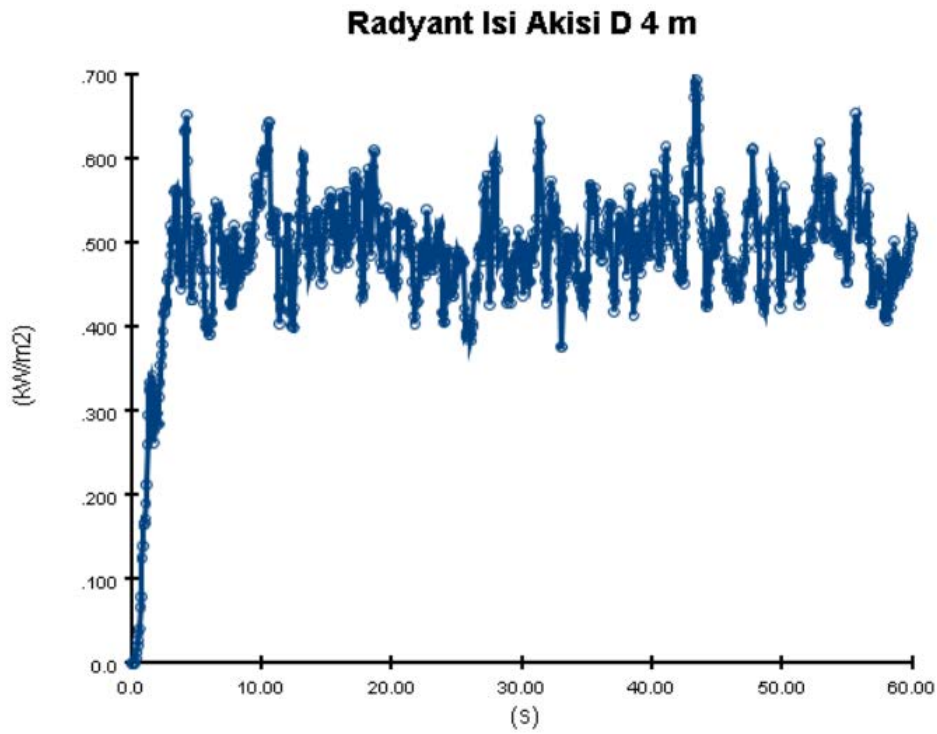
Şekil 5.7. İkinci deneyin (3 m) Radyant Isı Akısı sonuçları



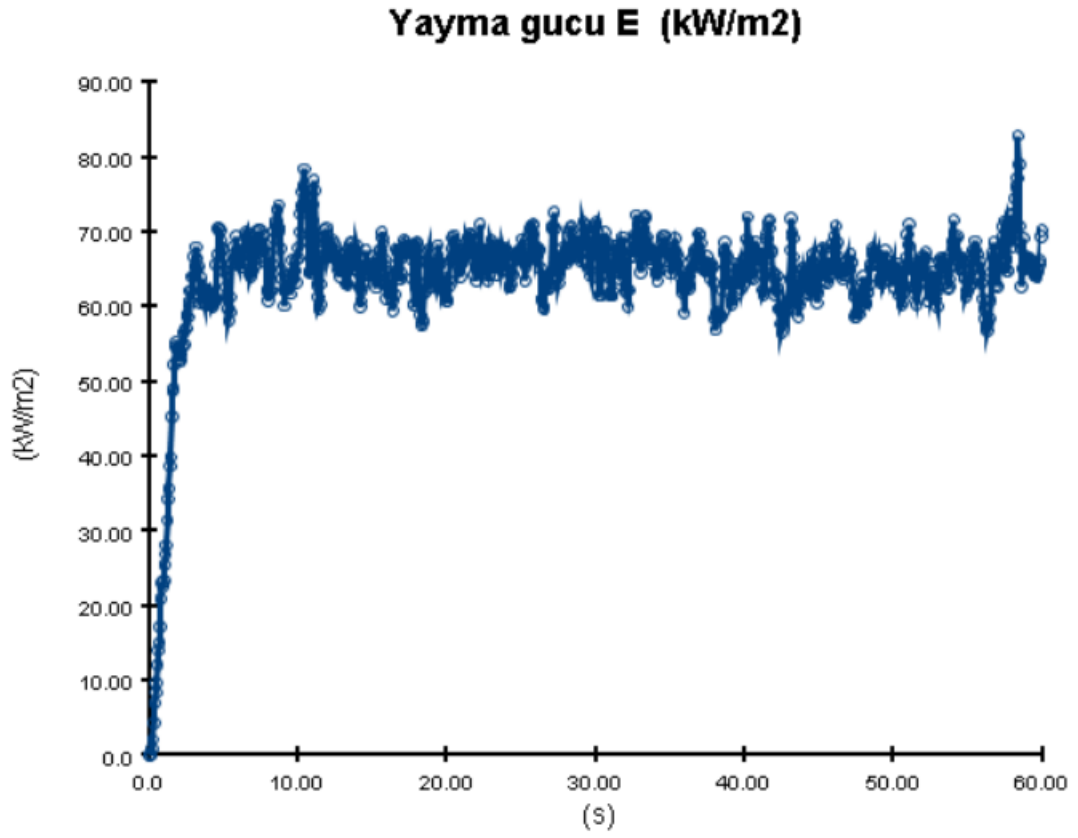
Şekil 5.6. İkinci deneyin (3 m) Yayma Gücü sonuçları



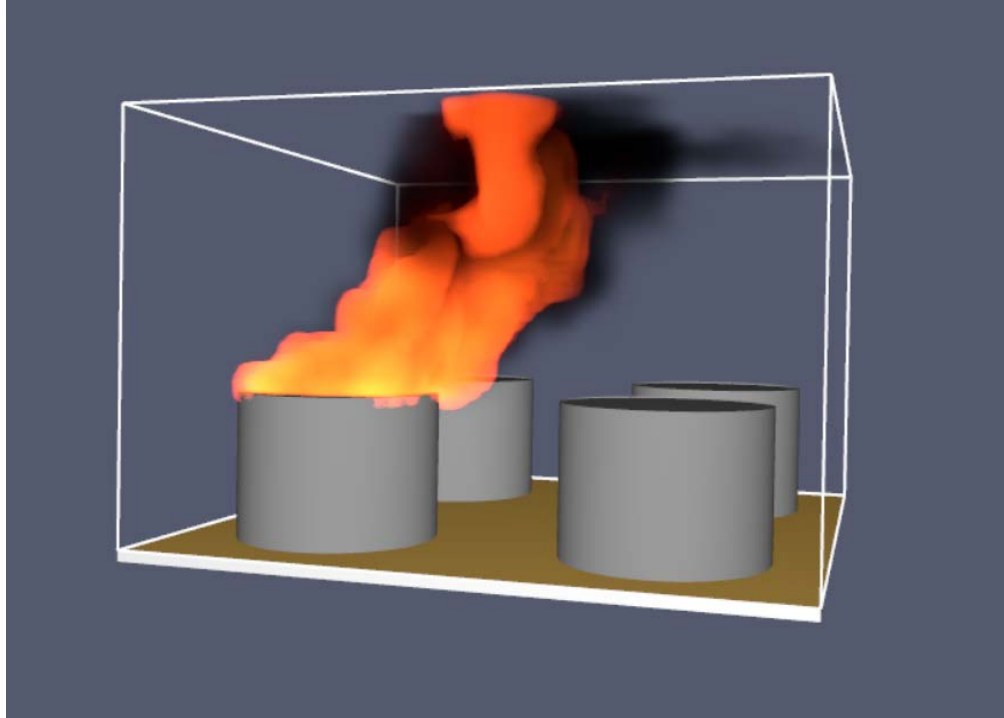
**Şekil 5.8.** 3 m çaplı tank için FDS simülasyonunda tahmin edilen benzin alevi şeklini gösteren görüntü



**Şekil 5.9.** Üçüncü deneyin (4 m) Radyant Isı Akısı sonuçları



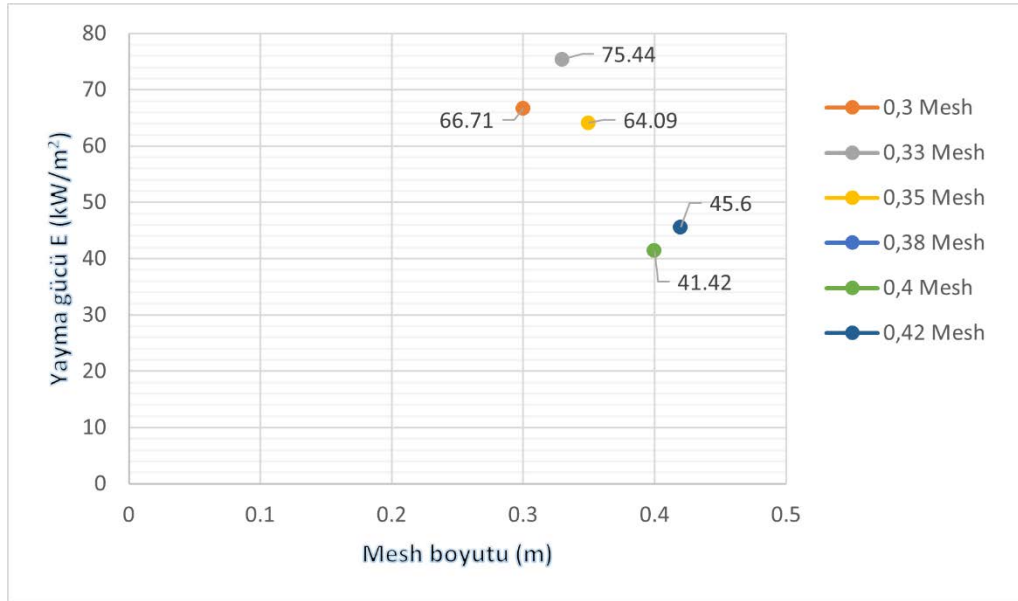
**Şekil 5.10.** Üçüncü deneyin (4 m) Yayma Gücü sonuçları



**Şekil 5.11.** 4 m çaplı tank için FDS simülasyonunda tahmin edilen benzin alevi şeklini gösteren görüntü

### 5.3.3.7. Farklı mesh boyutlarıyla yayma gücü ölçümü

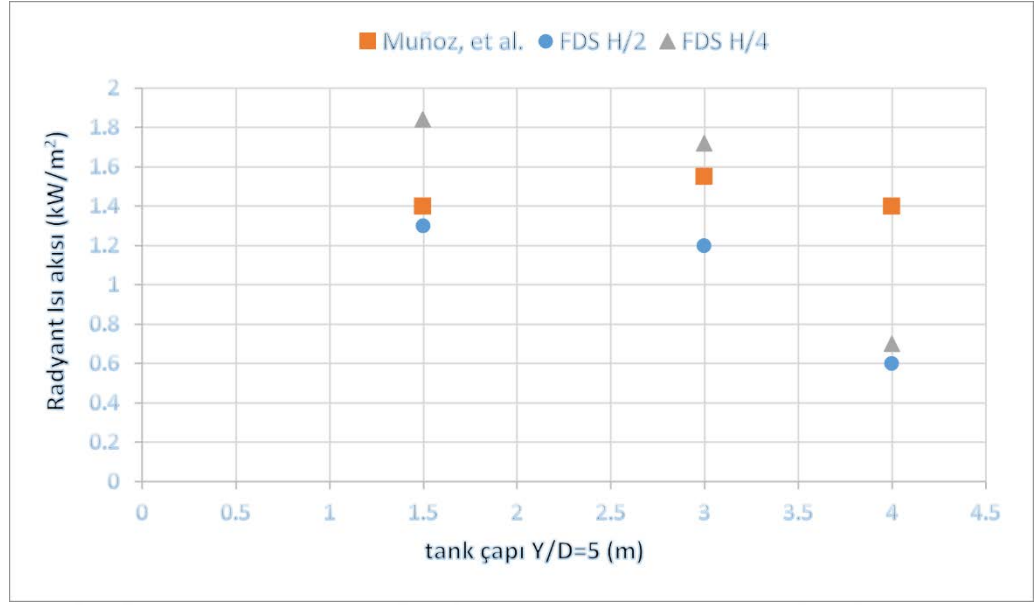
Meshin farklı boyutlarının birkaç durumunu incelerken, meshin farklı boyutlarıyla yapılan simülasyon sonuçlarına kıyasla aşağıdaki şekilde meshin ideal boyutunun 0,33 metre olduğunu görüyoruz. Elde ettiğimiz ortalama maksimum enerji 22500-23500 civarında idi ve Ortalama 23000 kW için  $D^*/5 = 0.67\text{m}$  ,  $D^*/10 = 0.33\text{m}$  çıkıyor, netice itibarıyla  $D^*/10=0.33\text{ m}$  aldım.



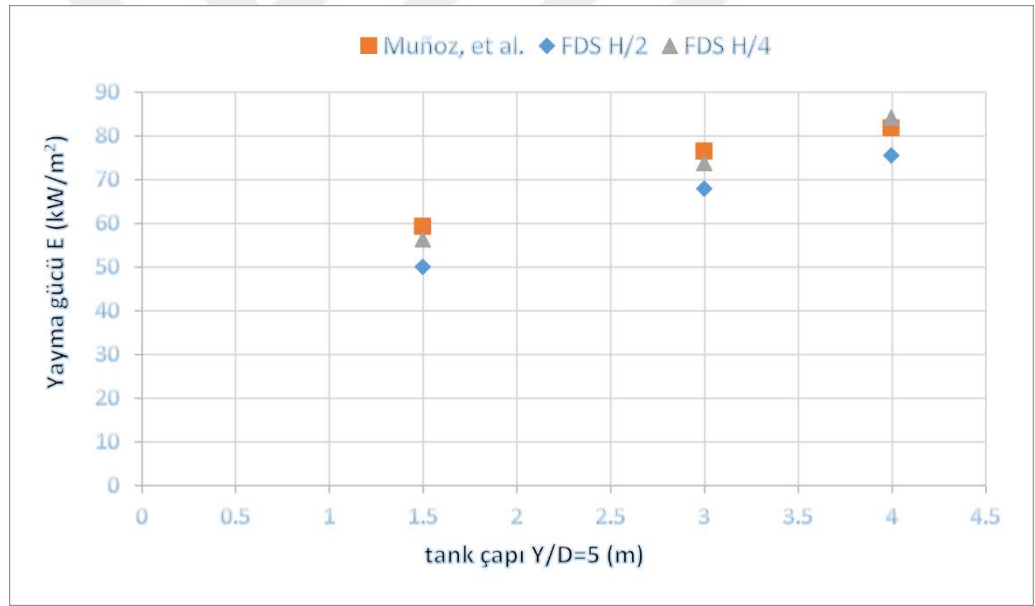
Şekil 5.12. Farklı mesh boyutlarıyla yayma gücünün sonuçlarını göstermektedir.

### 5.3. Model Çıktıları ile Deneysel Verilerin Karşılaştırılması

Verilerin modellerle karşılaştırılması düşünüldüğünde, havuz çapı gibi faktörler gerekliydi çünkü önceki çalışmalarda ampirik modellerde kullanılan korelasyonlar, büyük ölçüde 20 m veya daha büyük havuz çaplarına ait veriler kullanılarak doğrulandı. Bununla birlikte, FDS modelinin performansını doğrulamak için kullanılan deneyler nispeten küçük ölçekli olmuştur. Diğer bazı deneysel çalışmaları incelediğimizde, FDS sonuçlarının gerçek deneyselden daha düşük olduğunu gördük. Mansour (2012)' göre, FDS simülasyonu için yakınsama oranı %35 iken bu çalışmada Pyrosim programının son güncel versiyonu kullanılmış ve yakınsama oranı gerçek deneylere göre yaklaşık %76 çıkmıştır. Modellerin tahminleri ile güvenilir bir karşılaştırma elde etmek için, Girdi olarak atmosferik koşullar, hedef (radyometre) yönelimi ve konumu, yakıt tipi ve test kefişi çapı gibi deneysel parametreler kullanılmıştır.



**Şekil 5.13.** Üç tankın radyant ısı akısına ilişkin, FDS sonuçları ile deneysel verilerinin sonuçları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir.



**Şekil 5.14.** Üç tankın yayma gücüne ilişkin, FDS sonuçları ile deneysel verilerinin sonuçları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir.





## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, olaya bağlı radyant ısı akısına dayanarak yakındaki depolama tanklarında ikincil yangın olaylarının potansiyeli değerlendirilmiştir. Tank çiftliği yangın senaryosu durum çalışmaları öncesi, HAD modeli, benzin havuz yangını için deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Havuz yangınından yakın ve uzak mesafelerdeki radyasyon ısı akısının sayısal tahminleri için uygun giriş parametreleri, hassasiyet analizine dayanarak seçilmiştir. FDS'nin radyant ısı akısı tahminleri, havuz yangını deney sonuçlarına yakındır. Tank çiftliğinde üç havuz yangını senaryosunda sonuç modellemeleri yapılmıştır. Komşu benzin tanklarında alınan radyasyon ısı akıları analiz edilmiş ve incelenen dike havuz yangınının, tank çiftliğinde domino etkilerini tetikleme potansiyeline sahip olduğu tahmin edilir. 0 m/s rüzgâr hızlarında bile tank yangınının domino etkisi tetikleme potansiyeline sahiptir. FDS sonuçları, yangın komuta perspektifinden uygun yangın bastırma ve soğutma stratejileri ve taktiklerinin benimsenmesi için değerli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, HAD modelleme ile elde edilen nicel sonuçlar, tank çiftliğinin niceliksel risk değerlendirmesinde ve güvenli tank arası mesafelerin belirlenmesinde uygulanabilir. Bu çalışma, kütle yanma oranı parametresini iki farklı değerle inceledi:  $0,055 \text{ kg.m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (SFPA referansı) ve  $0,083 \text{ kg.m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Munoz'un çalışmasındaki değer). Sonuçlar, bu iki farklı kütle yanma oranının, 1,5 m, 3 m ve 4 m çaplı depolama tankları için radiant ısı akısı üzerindeki etkilerini göstermektedir.  $0,055 \text{ kg.m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  değeri uygulandığında, 1,5 m, 3 m ve 4 m çaplı tanklar için sırasıyla  $1,3 \text{ kW/m}^2$ ,  $1,28 \text{ kW/m}^2$  ve  $0,6 \text{ kW/m}^2$  radiant ısı akısı sonuçları elde edildi. Bu sonuçlar, yayma gücü değerlerine bağlı olarak  $50,03 \text{ kW/m}^2$ ,  $67,95 \text{ kW/m}^2$  ve  $81,67 \text{ kW/m}^2$  olarak hesaplandı.

Öte yandan,  $0,083 \text{ kg.m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  kütle yanma oranı uygulandığında, 1,5 m, 3 m ve 4 m çaplı tanklar için sırasıyla  $1,84 \text{ kW/m}^2$ ,  $1,72 \text{ kW/m}^2$  ve  $0,7 \text{ kW/m}^2$  radiant ısı akısı sonuçları elde edildi. Bu sonuçlar, yayma gücü değerlerine bağlı olarak  $56,37 \text{ kW/m}^2$ ,  $73,8 \text{ kW/m}^2$  ve  $84,12 \text{ kW/m}^2$  olarak hesaplandı. çalışmaları incelediğimizde, FDS sonuçlarının gerçek deneyselden daha düşük olduğunu gördük. Mansour (2012)' göre, FDS simülasyonu için yakınsama oranı %35 iken bu çalışmada Pyrosim programının

son güncel versiyonu kullanılmış ve yakınsama oranı gerçek deneylere göre yaklaşık %76 çıkmıştır.

FDS modeli, güvenlik çalışmalarında güvenle kullanılabilen bir modeldir. Güvenilir sonuçlar üretebilme yeteneği, modelin yaygın olarak tercih edilmesini sağlamaktadır. FDS modeli, yangın güvenliği konusunda detaylı analizler yapabilme yeteneğiyle öne çıkar. Özellikle depolama tankları arasındaki minimum ayırma mesafesinin belirlenmesi ve bitişik tanklar üzerindeki radyant ısı akısının etkisinin azaltılması gibi konularda önemli bir uygulama sunar.

Depolama tankları arasındaki minimum ayırma mesafesi, yangın sırasında olası bir yangının yayılmasını önlemek amacıyla belirlenir. FDS modeli, bu mesafenin belirlenmesinde etkili bir araçtır. Model, yangın senaryolarını simüle ederek, bitişik tanklara aktarılacak olan radyant ısı akısını hesaplayabilir. Böylece, depolama tankları arasındaki mesafenin ne kadar olması gerektiği konusunda değerli bilgiler sağlar.

Ayrıca, FDS modeli yangınla mücadele stratejilerinin belirlenmesinde de yardımcı olur. Özellikle, bitişik tanklara yayılan radyant ısı akısının etkisini azaltmak için yangınla mücadele ekipmanı ve su akış oranlarının belirlenmesinde kullanılabilir. Bu sayede, yangın söndürme operasyonlarının etkinliği artırılabilir ve potansiyel riskler minimize edilebilir.

FDS modelinin güvenilirliği ve verimliliği, geniş çaplı kullanımı ve endüstri tarafından kabul görmesiyle de desteklenmektedir. Model, detaylı analizler yapabilme yeteneğiyle birlikte hızlı sonuçlar üretebilir. Bu da, yangın güvenliği çalışmalarında zaman ve kaynak tasarrufu sağlar.

Sonuç olarak, FDS modeli güvenlik çalışmalarında güvenle kullanılabilir ve depolama tankları arasındaki minimum ayırma mesafesi gibi konularda önemli bir uygulama sunar. Yangınla mücadele stratejilerinin belirlenmesinde ve radyant ısı akısının etkisinin azaltılmasında etkili bir araçtır. FDS modeli, yangın güvenliği konusunda daha iyi bir anlayış sağlar ve daha etkili önlemlerin benimsenmesine katkıda bulunur.

## KAYNAKLAR

- Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Pasdarsahri, H., & Mohabadi, H. A. (2019). Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). *Process Safety and Environmental Protection*, 123, 379-389.
- Alimohammadi, I., Nouri, F., & Ghasemi, A. M. (2015). A novel method to design water spray cooling system to protect floating roof atmospheric storage tanks against fires. *Iranian Journal of Health, Safety and Environment*, 2(1), 235-242.
- Nolan, D. P. (2014). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles: for oil, gas, chemical and related facilities*. William Andrew.
- API, R. (2003). (2008; ) *Protection Against Ignitions Arising out of Static. Lightning, and Stray Currents*.
- Beyler, C. L., & Hirschler, M. M. (2002). Thermal decomposition of polymers. *SFPE handbook of fire protection engineering*, 2(7), 111-131.
- Chang, J. I., & Lin, C. C. (2006). A study of storage tank accidents. *Journal of loss prevention in the process industries*, 19(1), 51-59.
- Cowley, L. T., & Johnson, A. D. (1992). *Oil and gas fires: characteristics and impact*, OTI 92596. Health and Safety Executive, London.
- Hiroshi, K., & Taro, Y. (1988). Air entrainment and thermal radiation from heptane pool fires. *Fire Technology*, 24, 33-47.
- HSG 176, 1998. *Health and Safety Executive Guideline: The storage of flammable liquids in tanks*. Health and Safety Executive.
- Hume, B., & Eady, M. (2002). *The use of CFD computer models for fire safety design in buildings: Large warehouse case study*. Office of the Deputy Prime Minister, Fire Research Division.
- Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., ... & WIECZOREK, C. J. (Eds.). (2015). *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer.
- Jujuly, M. M., Rahman, A., Ahmed, S., & Khan, F. (2015). LNG pool fire simulation for domino effect analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 143, 19-29.
- LASTFIRE 1997, Moshashaei, P., Alizadeh, S. S., Jafarabadi, M. A., & Khazini, L. (2018). Prioritizing the causes of fire and explosion in the external floating roof tanks. *Journal of failure analysis and prevention*, 18, 1587-1600.
- Lautkaski, R. (1992). Validation of flame drag correlations with data from large pool fires. *Journal of loss prevention in the process industries*, 5(3), 175-180.

- Loy, Y. Y., Rangaiah, G. P., & Lakshminarayanan, S. (2018). Surrogate modelling of net radiation flux from pool fires in a hydrocarbon storage facility. *Process Safety and Environmental Protection*, 114, 296-309.
- Mandloi, D., & Lilley, D. (2011). FDS: Grid refinement studies with the Fire Dynamics Simulator Code for one-room structural fires with a variety of burning items. In 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (p. 528).
- Mansour, K. A. (2012). Fires in large atmospheric storage tanks and their effect on adjacent tanks (Doctoral dissertation, © Khalid Mansour).
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., & Overholt, K. (2013). Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model. NIST special publication, 1018(1), 175.
- McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J., 2019. Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide. NIST Building and Fire Research Laboratory. NIST SpecialPublication, Gaithersburg Maryland USA.
- Miao, Z., Wenhua, S., Ji, W., & Zhen, C. (2014). Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike. *Procedia Engineering*, 84, 565-577.
- Mudan, K. S. (1984). Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. *Prog. Energy Combust. Sci.*;(United Kingdom), 10.
- Muñoz, M., Arnaldos, J., Casal, J., & Planas, E. (2004). Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame*, 139(3), 263-277.
- National Fire Protection Association. (2010). NFPA 11: Standard for Low, Medium-, and High-Expansion Foam..
- National Fire Protection Association. (2021). NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code, 2021. National Fire Protection Association.
- Necci, A., Argenti, F., Landucci, G., & Cozzani, V. (2014). Accident scenarios triggered by lightning strike on atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering & System Safety*, 127, 30-46.
- NFPA-National Fire Protection Association. (2009). NFPA 15-standard for water spray fixed systems for fire protection. Quincy (MA): NFPA.
- NUMBER, T. (2021). American Petroleum Institute.
- Persson, H., & Lönnemark, A. (2004). Tank Fires-Review of fire incidents 1951-2003.
- Sharma, A., & Mishra, K. B. (2019). Experimental set-up to measure the maximum mass burning rate of storage tank fires. *Process Safety and Environmental Protection*, 131, 282-291.
- Shen, R., Jiao, Z., Parker, T., Sun, Y., & Wang, Q. (2020). Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 67, 104252.
- Siddapureddy, S., & Prabhu, S. V. (2017). Experimental and numerical simulation studies on heat transfer to calorimeters engulfed in diesel pool fires. *Journal of Fire Sciences*, 35(2), 156-176.

- Standard, A. P. I. (2013). Welded tanks for oil storage. American Petroleum Institute, 1220.
- Sun, B., Guo, K., & Pareek, V. K. (2014). Computational fluid dynamics simulation of LNG pool fire radiation for hazard analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 29, 92-102.
- Sun, B., Guo, K., & Pareek, V. K. (2015). Dynamic simulation of hazard analysis of radiations from LNG pool fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 35, 200-210.
- Thyer, A. M., Jagger, S. F., Atherton, W., & Ash, J. W. (2009). A review of catastrophic failures of bulk liquid storage tanks. *Loss Prev. Bull*, 205(3).
- Wang, W. H., Xu, Z. S., & Sun, B. J. (2013). Numerical simulation of fire thermal radiation field for large crude oil tank exposed to pool fire. *Procedia Engineering*, 52, 395-400.
- Yang, R., Khan, F., Neto, E. T., Rusli, R., & Ji, J. (2020). Could pool fire alone cause a domino effect?. *Reliability Engineering & System Safety*, 202, 106976.
- Yumoto, T. (1971). An experimental study on heat radiation from oil tank fire. FRI report, 33, 1-23.
- Zheng, B., & Chen, G. H. (2011). Storage tank fire accidents. *Process Safety Progress*, 30(3), 291-293.



## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet ABDULLAH

### ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2015, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Petrokimya Endüstri Mühendisliği Bölümü
- Yükseklisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Yangın ve Yangın Güvenliği Anabilim Dalı, Yangın ve Yangın Güvenliği (YL) (Tezli)

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016-2023 yılları arasında UNICEF tarafından desteklenen bir eğitim projesinde mülteci öğrenciler için öğretmen olarak çalıştı.