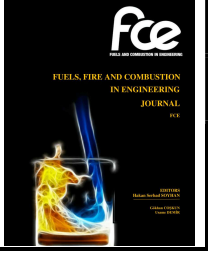
	MÜHENDİSLİKTE YAKITLAR, YANGIN VE YANMA DERGİSİ <i>FUELS, FIRE AND COMBUSTION IN ENGINEERING JOURNAL</i>		
	eISSN: 2564-6435 Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/fce		
	<u>Geliş/Received</u> 09.02.2023 <u>Kabul/Accepted</u> 01.11.2024	<u>Doi:</u> https://doi.org/10.52702/fce.1249101	

UÇUCU YANICI GAZLARIN BİRİKME DAVRANIŞININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Fırat CELEP¹, Gökhan COŞKUN^{2,3*}

ÖZET

Patlayıcı gazlar havadan ağır ve havadan hafif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gaz kaçaqları tespitinde farklı teknolojilere sahip gaz dedektörleri kullanılmaktadır. Bu sistemler için en önemli nokta gaz dedektörlerinin ortama yerleştirme konumudur. Doğru konumlanan sistemlerde gaz kaçaqlarının tespiti erken önlem almaya ve maddi-manevi zararları engellemeye yaramaktadır. Genel kabul olarak havadan ağır yanıcı gazların yer seviyesinden 20-30 cm yüksekte birikmesi beklenirken havadan hafif yanıcı gazların tavan seviyesinden 20-30 cm aşağıda birikmesi beklenir. Bu gazların nerede biriktiğinin tespiti dedektörler ile yapılabilirken bu zamana bağlı olarak birikmenin nasıl olduğunun deneysel yöntemlerle anlaşılması oldukça zor ve maliyetli deneysel sistemler gerektirmektedir. Bu sebeple Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile yapılacak simülasyonlar ile gaz hareketinin oldukça detaylı ve düşük maliyetli bir şekilde incelenebilmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada havadan hafif metan (CH₄) gazının muhtemel bir kaçak durumunda kapalı bir hacimde nasıl dağılı gösterdiği ve hangi yüksekliklerde biriktiği, HAD simülasyonu ile modellenmiş ve farklı yüksekliklere yerleştirilmiş sabit gaz dedektörlerinden alınan veriler kullanılarak simülasyon sonuçlarının doğruluğu irdelenmiştir. Fire Dynamic Simulator (FDS) yazılımı ile HAD simülasyonları yapılmıştır. Tavana yakın bölgelerde FDS simülasyonu sonuçları deneysel veriler ile uyumlu iken tabana yakın noktalardan alınan simülasyon sonuçlarının deneysel verilere göre daha yüksek konsantrasyonlara ulaştığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu yanıcı gazlar, HAD simülasyonu, Dedektör yerleşimi, Gaz dağılımı

INVESTIGATION OF THE ACCUMULATING BEHAVIOR OF VOLATILE FLAMMABLE GASES BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION METHOD


ABSTRACT


Explosive gases are classified into two types based on their density relative to air: heavier-than-air and lighter-than-air. Gas detectors employing various technologies are used for detecting gas leaks. The most critical factor in these systems is the placement of the gas detectors within the environment. Properly positioned systems allow for the early detection of gas leaks, enabling preventive measures and helping to prevent both material and intangible damage. Generally, heavier-than-air flammable gases are expected to accumulate 20-30 cm above ground level, while lighter-than-air flammable gases tend to accumulate 20-30 cm below ceiling level. While it is possible to detect where these gases accumulate using detectors, understanding the time-dependent accumulation patterns through experimental methods requires complex

and costly experimental setups. Therefore, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations provide a highly detailed and cost-effective means to examine gas movement. In this study, the behavior and accumulation heights of lighter-than-air methane (CH₄) gas in a confined space during a potential leak scenario are modeled using CFD simulations. The accuracy of the simulation results is evaluated using data from fixed gas detectors positioned at different heights. CFD simulations were conducted using the Fire Dynamic Simulator (FDS) software. While FDS simulation results are consistent with experimental data near the ceiling, simulation results near the floor show higher concentrations compared to the experimental data.

Keywords: Volatile flammable gases, CFD simulation, Detector placement, Gas dispersion

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Prosense Teknoloji San. Ltd. Şti, Cumhuriyet, Mermer Sk. No:16, 34876, 34876 Kartal/İstanbul, firat.celep@prosense.com.tr,  0000-0001-9279-9857

^{2*} Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, gcoskun@sakarya.edu.tr,  0000-0003-1485-4325

³ Sakarya Üniversitesi, Yangın Uygulama ve Araştırma Merkezi

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacımızı karşılamak için kullandığımız uçucu ve yanıcı gazların öncelikle yanma, patlama, zehirlenme ve boğma olmak üzere tehlikeleri bulunmaktadır [1]. Bu gazlar sanayide ve günlük yaşamda sıklıkla kullanılmakta ve tüketim miktarları sürekli artmaktadır [2]. Özellikle doğalgazın evlerde ve sanayide kullanımını en yoğun uçucu ve yanıcı gaz olduğu söylenebilir [3]. Bu gazların tehlikelerinden korunmak ve tehlikeyi en alt seviyeye indirmek için çeşitli yöntemler kullanılır. Bu yöntemleri kullanırken gazın davranışını iyi bir şekilde bilmek oldukça önemlidir. Gazın özelliklerini dikkate almadan alınana hatalı önlemler herhangi bir sızıntı anında gazın tespitinin yeterli seviyede veya hiç yapılamamasına sebep olacak tehlikeli durumların oluşmasına yol açabilecektir [4]. Bu sebeple uçucu yanıcı gazların birikim mekanizmaları, nerede birikebileceği ve nasıl davranacağı gibi bilgiler oldukça önemlidir ve gazın biriktiği ortamın fiziksel özellikleri de ayrıca bir öneme sahip olacaktır [5,6].

Patlayıcı gazlardan korunma yöntemlerinin en etkinini gaz kaçağı durumunda erken uyarı sistemleridir. Bu gazların havadan ağır ve havadan hafif olma özelliklerine göre kapalı mekânlarda birikme özellikleri farklılık göstermektedir. Gaz sızıntılarının ve birikmelerin tespitinde, gaz türüne uygun çeşitli gaz dedektörleri kullanılmalıdır. Gaz kaçağı tespit sistemlerinde en önemli unsur, gaz algılama sistemlerinin doğru konumlara yerleştirilmesidir. Doğru şekilde konumlandırılan gaz dedektörleri sayesinde gaz kaçakları ölçülerek erken önlem alınabilir [4].

Gaz kaçaklarının tespitinde çeşitli algılama sistemleri ticari olarak bulunmakta ve gelişen teknoloji ile daha hızlı algılama yapabilen sensörler ve yapay zekâ destekli görüntü işleme ile gaz algılaması üzerine çalışmalar devam etmektedir. Fakat gazın zamanla kapalı bir ortamda birikme karakteristiği üzerine yapılan deneysel çalışmalar oldukça maliyetli ve zordur. Deneysel çalışmalara alternatif olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle gaz hareketlerinin modellenmesi ve oldukça ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi mümkündür [7]. Zaman bağlı gaz akışının modellenmesi probleme göre değişmekle birlikte sürekli koşulların HAD çözümüne göre oldukça uzun olduğu söylenebilir. Bu sebeple zamana bağlı

gas akışı çözümünün yapıldığı özel HAD yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan biri olan Fire Dynamics Simulator (FDS) [8] kodu özellikle yangın ile ortaya çıkan gazların ve ısının yayılmasının zaman bağlı olarak modellenmesi için geliştirilmiştir bir HAD yazılımıdır ve yangın dumanını ve ısısının dağılımının FDS ile modellendiği birçok çalışma bulunmaktadır [9–11].

Bu çalışmada uçucu-yanıcı gazların en çok kullanılanı olan metan (CH_4) gazının birikme davranışı HAD simülasyonu yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Sekiz adet CH_4 dedektörünün yukarıdan aşağı doğru 10 cm mesafe ile sıralandığı kapalı bir odanın 3 boyutlu model oluşturulmuştur. Kapalı odanın alt noktasından olan gaz girişi ile zamana bağlı olarak gaz birikmesi FDS kodu kullanılarak HAD simülasyonu yapılmıştır. Sensörlerin ölçüm yaptığı noktalardan elde edilen zamana bağlı CH_4 konsantrasyonu değişimleri deneysel verilerle karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Odanın alt bölgesinden ortama Metan gazı verilerek modelleme yapılmıştır. Kabin ve gaz dedektörleri 3-boyutlu modeli oluşturulmuştur. Fire Dynamics Simulator (FDS) çözücüsüne sahip Pyrosim [12] yazılımı ile simülasyonlar hazırlanmış oluşturulmuştur ve elde edilen verilerle deneysel verilerle [13] karşılaştırılarak doğruluğu irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre üst katmanlarda oluşan gaz birikmesinin Had modeli ile deneysel sonuçlar oldukça iyi bir şekilde örtüşmüştür fakat alt katmanlara doğru HAD simülasyonu sonuçları deneysel sonuçlardan daha yüksek konsantrasyonlara ulaşmıştır. Deneysel koşullardaki muhtemel gaz kaçaklarının modele dahil edilmesinin daha iyi yakınsamaya ulaşmakta faydalı olacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

Metanın kapalı hacimlerde birikme mekanizması, katmanlaşması ve üst tabakalarda hangi yükseklikte yoğunlaştığının tespiti kapalı bir ortama konulan dedektörler vasıtası ile sınırlı sayıda noktadan alınacak verilerde kısmen tespit edilebilir. HAD simülasyonları ile bu noktalardan alınan verilerin doğrulanması ve sonrasında çok hassas bir şekilde gazın katmanlaşması ve birikme davranışının incelenmesi ve farklı hacimlerde de aynı sistemlerle modellenerek detaylı verilerin elde edilmesi mümkündür. Çalışmada FDS çözücüsü ile HAD simülasyonu yapılmıştır. FDS

çözücüsünde zamana bağlı gaz akışı çözülebilmekte ve gazın türbülansı için gerçekçi bir çözüm sağlayan Large-Eddy Simülasyonu (LES) [14,15] türbülans modeli kullanılabilir.

FDS çözücüsünde kullanılan akış ile ilgili denklemler;

Kütlenin Korunumu

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad 1$$

Momentumun Korunumu

$$\rho \left(\frac{\delta u}{\delta t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad 2$$

Enerjinin Korunumu

$$\frac{\delta(\rho h)}{\delta t} + \nabla \cdot \rho h u - \frac{Dp}{Dt} = \dot{q}''' - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l \quad 3$$

Maddenin Kronumu

$$\frac{\delta(\rho Y_l)}{\delta t} + \nabla \cdot \rho Y_l u = (\rho D)_l \nabla Y_l + w_l''' \quad 4$$

FDS çözücüsünde türbülans hesaplaması için Doğrudan Sayısal Simülasyon (DNS) veya LES türbülans modelleri kullanılabilir. DNS modeli çok daha küçük ağ yapıları gerektirmekte çözümlenmesi oldukça pahalı ve uzun zaman almaktadır. LES türbülans modeli çözüm yaklaşımı sayesinde türbülansı oldukça iyi yakalamakta ve ayrıca DNS modeline göre çok daha büyük ağ yapıları ile hızlı çözüm yapabilmektedir. LES modeli, büyük ölçekte girdapları hesaplar ve viskozite, termal iletkenlik, yayılımı daha kısa zaman içerisinde çözüme ulaştırır. Çözümleme için aşağıdaki denklemleri kullanılır.

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 \left[2 \bar{S}_{ij} : \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \bar{u})^2 \right]^{1/2} \quad 5$$

Burada C_s sabit bir sayıdır ve Pyrosim'de 0,2 değerinde varsayılan olarak tanımlanmıştır. Δ filtre genişliği, \bar{S}_{ij} gerinim tensörünün simetrik oranını göstermektedir. Kütle ve termal yayılma gibi diğer yayılma parametreleri türbülans viskozitesi ile ilgilidir.

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{Pr_t}, (\rho D)_t = \frac{\mu_t}{Sc_t} \quad 6$$

Ar_t ve Sc_t Pyrosim'de varsayılan olarak 0,5 tanımlanmıştır. Literatürde bu değerlerin yapılan deneysel çalışmalarla uyum sağladığı bilinmektedir.

2.1. Modelin Özellikleri

Bu çalışmada kabin ve dedektör yerleşimleri birebir deneysel olarak 3 boyutlu modele uygulanmıştır. Dikdörtgen kesitli kabin 0,8x0,8x1,5 m (en, uzunluk, yükseklik) boyutlarına sahiptir ve şekil 1'de görülmektedir. Bu ölçüler referans olarak alınan gerçek kabin boyutlarıdır.

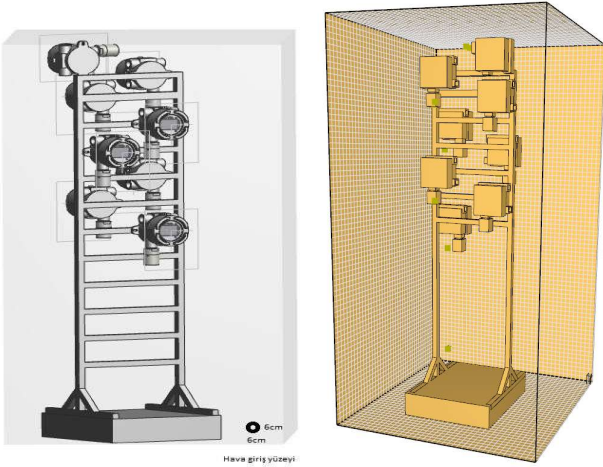
Her biri 80x80x25 mm boyutlarındaki sabit gaz dedektörleri şekil 1'de görüldüğü üzere taşıyıcı bir platform üzerine 8 ayrı farklı konuma yerleştirilmiştir. Bu konumlar en yakın aralıklarla ve tavan noktasına en yakın yerleştirilebilecek konumlar olarak seçilmiştir. Dedektör konumları tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Dedektörlerim zemine göre kabin içerisine yerleşim yükseklikleri

Dedektör (Gas) 1	1,43 m
Dedektör (Gas) 2	1,21 m
Dedektör (Gas) 3	1,13 m
Dedektör (Gas) 4	1,02 m
Dedektör (Gas) 5	0,92 m
Dedektör (Gas) 6	0,84 m
Dedektör (Gas) 7	0,74 m
Dedektör (Gas) 8	0,64 m

Gaz dedektörleri Prosense marka PQD-3135 model sabit gaz dedektörü referans alınarak kurgulanmıştır. Kabin içerisine hava gaz karışımı girişi için 4 mm çapında kabinin en alt noktasında olacak şekilde bir giriş alanı tanımlanmıştır. İçerideki karışımın yayılabilmesi ve içerideki basıncın dengelenebilmesi çözüm hacminin en alt bölgesine çıkış alanı tanımlanmıştır. % 1,25 metan gazına sahip hava-metan karışımı 20 lt/dk sabit debide hacim içerisine girecek şekilde modelde giriş koşulu tanımlanmıştır. Bu karışım ayrıca çözüm hacmine 30 °C sıcaklıkta giriş yapacak şekilde ayarlanmıştır. HAD modeli kurgulanan deneysel uygulamadaki gerçek gazın değer ve sıcaklıkları referans alınmıştır. Simülasyon modelinde dörtgen ağ yapısı kullanıldığından ve FDS yazılımı ağ yapısını çözüm hacmindeki katı modellerin etrafına otomatik bir şekilde konumlandırıldığından dolayı 3 boyutlu modelde

silindirik dedektörler dikdörtgen prizma formunda çizilerek HAD simülasyonunda kullanılmıştır. Bu sayede ağ yapısı kaynaklı ortaya çıkabilecek çözüm hataları minimize edilmiştir. Şekil 1’de orijinal 3B model ve FDS için hazırlanan 3B model görülmektedir. Ayrıca modelin ağ yapısı da şekil 1’de görülmektedir. Toplamda 120.000 adet çözüm ağının kullanıldığı modelde 2x2x2 cm hücre boyutuna sahip kübik ağlarla HAD çözümleri yapılmıştır.



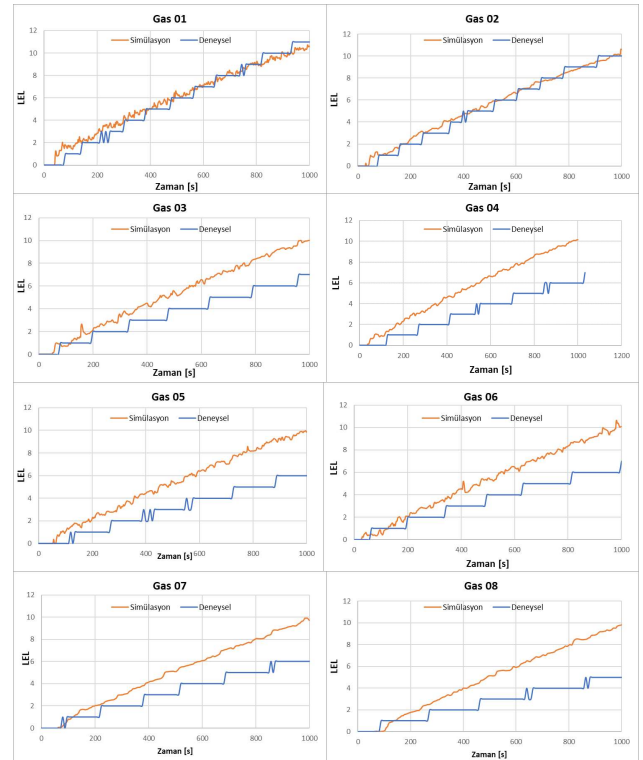
Şekil 1. Orijinal ve FDS için hazırlanan 3B modeller ve ağ yapısı

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI

FDS ile çözülen HAD simülasyonu sonuçları PyroSim Results programı kullanılarak görselleştirilmiştir. Ayrıca FDS çözümünde dedektörlerin tam olarak ölçüm yaptığı konumlardan metan gazının konsantrasyonu zamana bağlı olarak kaydedilip deneysel verilerle birlikte grafik olarak çizdirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda metan gazının kabin içerisindeki zamana bağlı değişimi görsel ve grafiksel olarak verilmiştir.

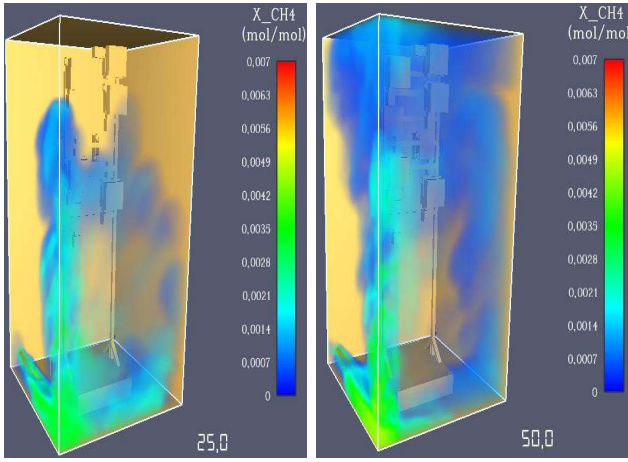
Şekil 2’deki grafiklerde Gas 01 (143 m) dedektörü ve Gas 02 (121 m) dedektörü için HAD simülasyonundan elde edilen verilerin oldukça iyi bir şekilde örtüştüğü ve 1000 saniye ölçüm süresi boyunca devam uyumuz devam ettiği görülmektedir. Her iki dedektör verisinin 1000 saniyede 10 LEL değerine ulaştığı anlaşılmaktadır. Gas 3 noktasından alınan metan gazı HAD sonuçlarına göre 200 saniye boyunca deneysel veri ile uyumlu olarak arttığı fakat 200. Saniyeden sonra HAD sonucunun daha yüksek LEL değerlerini ölçmeye başladığı ve 1000. saniyede ise HAD verisinin 10 LEL deneysel verinin ise 7 LEL civarında olduğu görülmektedir. Gas 4 ve

Gas 5 sonuçlarına göre yaklaşık 50 saniyede simülasyon verisinin 1 LEL değerine geldiği ve bu andan itibaren sürekli artarak deneysel veri ile arasında 1000. saniyede 4 LEL gibi bir farka kadar arttığı anlaşılmaktadır. Gas 6 ve Gas 7 verilerinin ilk 200 saniyeye kadar deneysel verilerle uyumlu olduğu ama sonrasında her iki simülasyon sonucunun da yaklaşık 3 LEL civarında bir fark ile daha yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Kabinin en altında bulunan Gas 8 dedektörü deneysel verisinin göre diğer tüm sonuçlara göre daha düşük LEL değerinde kaldığı görülmekte ve ayrıca simülasyon ile deneysel sonucun en uyumsuz olduğu ölçüm noktası olduğu anlaşılmaktadır. Simülasyon verilerinin hepsi 1000 saniye boyunca birbirlerine paralel bir artış sergilerken deneysel verilerde üstten alta doğru ölçülen LEL değerlerinin zamanla azaldığı anlaşılmaktadır. Yani metan gazının katmanlaşması deneysel verilere göre çok daha bariz bir şekilde ortaya çıktığı sonucuna varılmaktadır.



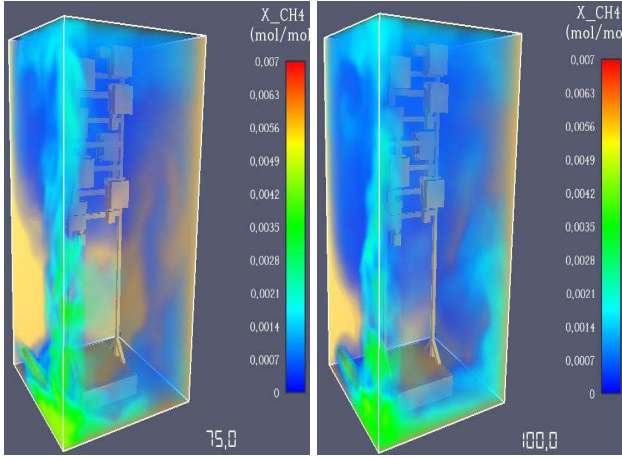
Şekil 2. HAD ve deneysel çalışmalardan elde edilen zamana bağlı metan LEL değerlerinin karşılaştırması

Şekil 3’de metan gazının mol oranının 25. ve 50. saniyelerdeki kabin içerisindeki konsantrasyonları görülmektedir. 25. saniyede metanın henüz kabinin tavanına ulaşmadığı anlaşılmaktadır. 50. saniyede ise metanın tavana ulaştığı ve ayrıca tavadan aşağıya doğru katmanlaşmaya başladığı dikkat çekmektedir.



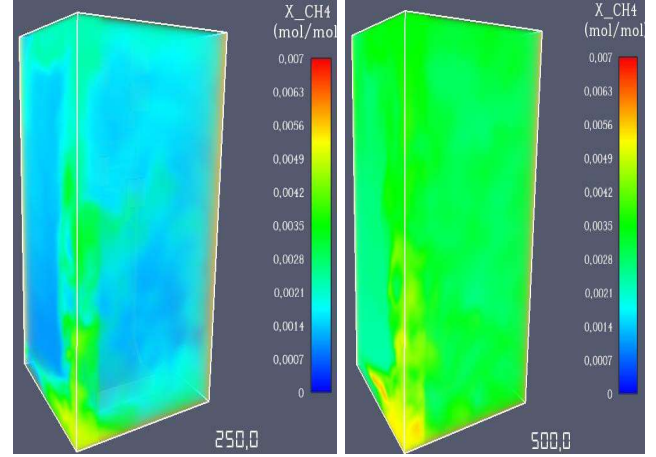
Şekil 3. Metan mol oranının 25. ve 50. saniyelerde simülasyon gösterimi

Şekil 4'de 75. saniyede metan gazının kabinin orta noktasına kadar biriktiği 100. saniyede ise kabinin alt seviyesine kadar yukarıdan aşağıya doğru birikme olduğu görülmektedir.



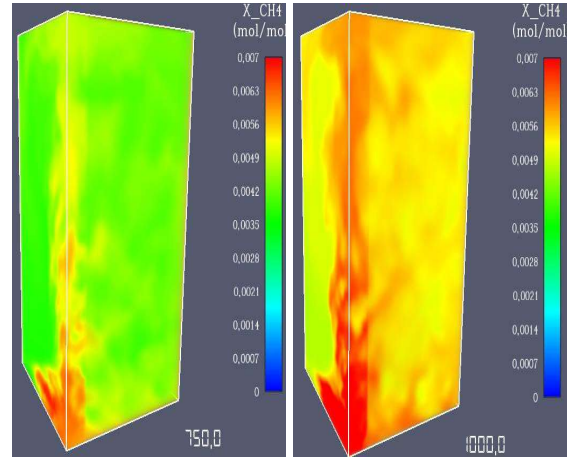
Şekil 4. Metan hacim oranının 75. ve 100. saniyelerde simülasyon gösterimi

Şekil 5'de 250. saniyede metan gazının kabinin en alt seviyesine kadar ulaşarak neredeyse tamamen tüm hacmi kapladığı görülmektedir. BU anda üst katmandaki metan gazı derişikliğinin alt katmanlara göre daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. 500. saniyeye gelindiği zaman ise oda içerisinde çok daha homojen bir gaz birikmesi dikkat çekmektedir. Üst bölgelerde bir miktar daha fazla metan konsantrasyonu varlığı görülse de deneylerde ortaya çıkan bariz konsantrasyon farkının simülasyonda tam olarak yakalamadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5. Metan hacim oranının 250. ve 500. saniyelerde simülasyon gösterimi

Şekil 6'da 750. saniyede oda içerisindeki dağılımın yine 500. saniyedeki gibi homojen olarak kaldığı ama metan konsantrasyonunun da artmaya devam ettiği görülmektedir 1000. saniyede ise üst katlardaki tabakalaşmanın biraz daha anlaşılır hale geldiği görülmektedir. Artık tavan bölgesinden başlayarak tüm hacmin %15 metan konsantrasyonuna doğru dolmaya başladığı da anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Metan hacim oranının 750. ve 1000. saniyelerde simülasyon gösterimi

4. SONUÇLAR

HAD modelinde 8 farklı dedektörden alınan görsel ve grafik verileri ile sonuçlar paylaşılmıştır. Grafik verilerine ayrıca deneysel veriler eklenerek simülasyon sonuçlarının tutarlılığı için karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- Alt tarafta kalan sensörlerden elde edilen simülasyon sonuçları, fiziki olarak yapılan deneylere göre tam bir tutarlılık elde edilememiştir. Bunun sebebi gazın kapalı kabinin alt bölgelerinde sızıntı modele eklenmemiştir ama deneysel çalışmada birleşim noktaları ve kabin kapısından muhtemel sızıntılar sebebiyle konsantrasyonun azaldığı düşünülmektedir.
- Simülasyon sonuçlarına göre gaz karışımının kabin içerisinde homojen olarak dağıldığını ve gazın kabin köşelerinde daha yüksek konsantrasyona sahip olduğu söylenebilir.
- Gaz kaçağına en hızlı tepki veren dedektörün Gas 01 konumlu dedektör olduğu anlaşılmıştır. Deneysel olarak en iyi sonucun dedektörlerin tavandan aşağı ve duvar diplerine konulması gerektiği varsayımı çıkarılabilir.
- Simülasyon sonuçlarına göre kabin içerisine ortaya çıkan sızıntılarında modele eklenmesiyle deneysel verilere daha yakın sonuçların elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

Tüm bu sonuçlara göre başka bir HAD yazılımı kullanılarak simülasyonun tekrar edilmesi, giriş bölgesinden ağ yapısının daha fazla küçültülerek çözümün tekrarlanması gibi yeni çalışmaların yapılarak daha doğru bir simülasyon stratejisinin geliştirilmesi planlanmaktadır.

REFERANSLAR

- [1] Schatzmann M. Accidental Releases of Heavy Gases in Urban Areas. *Wind Climate in Cities* 1995;555–74. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_27.
- [2] Cashdollar KL, Zlochower IA, Green GM, Thomas RA, Hertzberg M. Flammability of methane, propane, and hydrogen gases. *J Loss Prev Process Ind* 2000;13:327–40. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(99\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(99)00037-6).
- [3] Nd G, In C. APPLICATION OF NATURAL GAS AS FUEL. *Chemical Engineering of Oil and Gas* 2000.
- [4] Özkan Karataş. Endüstriyel Tesislerde Patlayıcı, Yanıcı ve Zehirli Gazlar için Gaz Algılama Sistemleri. *Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi* n.d.
- [5] Wang T, Liang H, Luo Z, Su B, Liu L, Su Y, et al. Near flammability limits behavior of methane-air mixtures with influence of flammable gases and nitrogen: An experimental and numerical research. *Fuel* 2021;294:120550. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.120550>.
- [6] Cashdollar KL, Zlochower IA, Green GM, Thomas RA, Hertzberg M. Flammability of methane, propane, and hydrogen gases. *J Loss Prev Process Ind* 2000;13:327–40. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(99\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(99)00037-6).
- [7] Tulach A, Mynarz M, Kozubkova M. Study of Distribution and Quantification of Flammable Gas in Confined Space. *Applied Mechanics and Materials* 2014;638–640:2097–100. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFI.C.NET/AMM.638-640.2097>.
- [8] Kevin B. McGrattan RJM. *Fire Dynamics Simulator* n.d.
- [9] Etkilenme Oranını Azaltan ve Tahliyeyi Kolaylaştıran Yöntemlerin Etkinliğinin Simülasyon Destekli İncelenmesi Y, Bakım ve Huzurevleri Modeli Kerem İLBAY Y, Coşkun G, Büyükkaya E. Yangından Etkilenme Oranını Azaltan ve Tahliyeyi Kolaylaştıran Yöntemlerin Etkinliğinin Simülasyon Destekli İncelenmesi: Yaşlı Bakım ve Huzur Evleri Modeli. *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi* 2022;10:120–31. <https://doi.org/10.52702/FCE.1111328>.
- [10] Uluç K, Coşkun G, Büyükkaya E. Alışveriş Merkezlerinde Yangın Anında Tahliye Olanaklarının Bilgisayar Destekli Simülasyon Programları İle Performans Bazlı Değerlendirilmesi. *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi* 2022;10:108–19. <https://doi.org/10.52702/FCE.1111132>.
- [11] Kadı F, Coşkun G, Büyükkaya E. Tahliye Sırasında Yangın Dumanından Etkilenme Oranlarının Simülasyon Destekli İncelenmesi: Bir Hastane Modeli. *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi* 2022;10:103–7. <https://doi.org/10.52702/FCE.1111061>.
- [12] Pyrosim n.d.
- [13] Özkan Karataş. Havadan hafif patlayıcı gazların kapalı ortamlarda birikme davranışının deneysel olarak incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi*, 2023.
- [14] GENERAL CIRCULATION EXPERIMENTS WITH THE PRIMITIVE

EQUATIONS in: Monthly Weather Review Volume 91 Issue 3 (1963) n.d.
https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/91/3/1520-0493_1963_091_0099_gcewtp_2_3_co_2.xml (accessed October 30, 2024).

- [15] Deardorff JW. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. J Fluid Mech 1970;41:453–80.
<https://doi.org/10.1017/S0022112070000691>.