

**İMALAR PROSESİ KAYNAKLI BORU İÇİ  
TIKANIKLIĞININ GİDERİLMESİNE YÖNELİK HAVA  
JETİ UYGULAMASININ NÜMERİK İNCELENMESİ**

**İbrahim ALTIN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İMALAT PROSESİ KAYNAKLI BORU İÇİ TIKANIKLIĞININ  
GİDERİLMESİNE YÖNELİK  
HAVA JETİ UYGULAMASININ NÜMERİK İNCELENMESİ**

İbrahim ALTIN  
502010039

Prof. Dr. A. Alper ÖZALP  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2023  
**Her Hakkı Saklıdır.**

## TEZ ONAYI

İbrahim ALTIN tarafından hazırlanan “İmalat Prosesi Kaynaklı Boru İçi Tıkanıklığının Giderilmesine Yönelik Hava Jeti Uygulamasının Nümerik İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. A. Alper ÖZALP

**İkinci Danışman:**  
(Varsa Yazılacak)

|                 |   |      |
|-----------------|---|------|
| <b>Başkan :</b> | Unvanı, Adı ve Soyadı<br>000-000-000-000<br>.....Üniversitesi<br>.....Fakültesi,<br>.....Anabilim Dalı  | İmza |
| <b>Üye :</b>    | Unvanı, Adı ve Soyadı<br>000-000-000-000<br>.....Üniversitesi,<br>.....Fakültesi,<br>.....Anabilim Dalı | İmza |
| <b>Üye :</b>    | Unvanı, Adı ve Soyadı<br>000-000-000-000<br>.....Üniversitesi,<br>.....Fakültesi,<br>.....Anabilim Dalı | İmza |
| <b>Üye :</b>    | Unvanı, Adı ve Soyadı<br>000-000-000-000<br>.....Üniversitesi,<br>.....Fakültesi,<br>.....Anabilim Dalı | İmza |
| <b>Üye :</b>    | Unvanı, Adı ve Soyadı<br>000-000-000-000<br>.....Üniversitesi,<br>.....Fakültesi,<br>.....Anabilim Dalı | İmza |

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**  
**Prof. Dr. ....**  
**Enstitü Müdürü**  
**.././....(Tarih)**

## Bilimsel Etik Bildirim Sayfası

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.././....

**İmza**

**İbrahim ALTIN**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

**Prof. Dr. A. Alper ÖZALP**  
Tarih

**İbrahim ALTIN**  
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### İMALAT PROSESİ KAYNAKLI BORU İÇİ TIKANIKLIĞININ GİDERİLMESİNE YÖNELİK HAVA JETİ UYGULAMASININ NÜMERİK İNCELENMESİ

**İbrahim ALTIN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. A. Alper ÖZALP

Dünya genelinde önemli bir yeri olan dizel yakıt tüketimli araçlarda dizel yakıt enjektörleri motor performansını, silindir içindeki yanma verimliliğinin ve emisyon değerlerini etkilemektedir. Enjektörlerin tasarım ve imalat süreçleri çok daha detaylı olarak ele alınır bir noktaya taşınmıştır. Dizel enjektör gövdelerinde yakıt delikleri klasik delik delme (drilling) prosesi ile açılmaktadır. Bu imalat süreci sonrasında delik yüzeyinde kalan çapak ve olası pürüzlülüklerin giderilmesi amacıyla Aşındırıcı Akış ile işleme (Abrasive Flow Machining- AFM) prosesi uygulanmaktadır. Bahsi geçen AFM prosesi yüzey işlenmesi zor olan parçaların, içeriğinde aşındırıcı özelliğe sahip tanecikler bulunduran bir macun ile basınçlı olarak yüzeylerin işlenmesidir.

Bu çalışmada, dizel enjektör yakıt deliğindeki yüzey işleme sonrasında delik iç yüzeyinde bulunan AFM macun kalıntılarının hava jeti uygulamasıyla temizlenmesi üzerine nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada benzer sorunlar için dünyadaki ve ülkemizdeki yapılan çalışmalar derlenmiş ve temizlik değerlendirme kriterleri araştırılmıştır. Literatür çalışmaları kapsamında farklı parametrelere sahip nozul tasarımları CAD programı yardımıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan her bir model üzerinde ANSYS Fluent programında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan nümerik analizler sonucunda dizel enjektör yakıt deliğindeki AFM prosesi sonrasında yeterli temizlik oranının sağlanabilmesi için gerekli optimum temizlik parametreler belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** HAD, Lüle, Hava Debisi, Sayısal İnceleme, Hava Jeti, Boru içi Hava Akışı, Sürekli Rejim, Partikül Temizleme  
**2023, x +81 Pages.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

### İMALAT PROSESİ KAYNAKLI BORU İÇİ TIKANIKLIĞININ GİDERİLMESİNE YÖNELİK HAVA JETİ UYGULAMASININ NÜMERİK İNCELENMESİ

İbrahim ALTIN

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. A. Alper ÖZALP

In vehicles that consume diesel fuel, which is an important place worldwide, diesel fuel injectors affect engine performance, combustion range covering the cylinder and emission values. Therefore, the design and manufacturing processes of injectors have been moved to a point where they are handled in much more detail. Fuel holes in diesel injector bodies are opened with the classical drilling process. After this manufacturing process, the Abrasive Flow Machining (AFM) process is applied in order to remove the burrs and possible roughness on the hole surface. The aforementioned AFM process is the pressure treatment of the parts that are difficult to surface treatment with a paste containing particles with abrasive properties.

In this study, numerical analyzes were carried out on the cleaning of AFM paste residues on the inner surface of the diesel injector fuel hole by air jet application after surface treatment. In the study carried out, studies conducted in the world and in our country for similar problems were compiled and cleaning evaluation criteria were investigated. Nozzle designs with different parameters were created with the help of CAD program within the scope of literature studies. Computational Fluid Dynamics (CFD) analyzes were performed on each model created in ANSYS Fluent program. As a result of the numerical analyzes made, the optimum cleaning parameters required to ensure sufficient cleaning rate after the AFM process in the diesel injector fuel hole were determined.

**Key words:** CFD, Nozzle, Air Flow, Numarical Analysis, Air Jet, In-Pipe Air Flow, Continuous Reg,Me, Particle Remove  
**2023, x +81 Pages.**

## TEŞEKKÜR

Gerçekleőtirmiő olduğum alıőmanın her aşamasında desteğini esirgemeyen, eğitim hayatımın her aşamasında bilgi ve tecrübesi ile birçok konuda bana yol gösteren saygı değer hocam Prof. Dr. A. Alper ÖZALP'e, tez çalıőmamın oluşmasına fırsat veren, teknik alanda becerilerimin geliőmesinde yardımlarını esirgemeyen Doğu Pres Ar-Ge Merkezi yöneticileri ve çalışma arkadaşlarıma, çalıőmalarımda ve iş hayatımda beni cesaretlendiren ve kolaylık sağlayan yöneticim Serhat EKMEKÇİ'ye, sayısal analiz çalıőmalarımda ve HAD analizi süreçlerinde bana destek olan bilgi ve deneyimleriyle bana katkılar sağlayan çalışma arkadaşım Murat MERMER'e, tez yazım aşamasında deneyimlerini esirgemeyen ve yorumları ile katkıda bulunan Ahmet Gőkhan POYRAZ'a ve Gülçin DENİZ'e, karşılaőtığım teknik problemlerde bana destek ve yardımlarını esirgemeyen Oktay AVUŐOđLU'na, hayatım boyunca yanımda olan manevi desteklerini esirgemeyen ailem annem Hanife ALTIN, babam Seyit ALTIN ve kardeőim Ömer ALTIN'a, bugüne kadar yüksek lisans eğitimime destek veren ve üzerimde emeği olan hocalarıma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

İbrahim ALTIN

19 / 06 / 2023



## İÇİNDEKİLER

|   | Sayfa |
|---|-------|
| ÖZET.....   | i     |
| ABSTRACT.....   | ii    |
| TEŞEKKÜR .....  | iii   |
| İÇİNCEKİLER.....  | iv    |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....   | vi    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | vii   |
| ÇİZERGELER DİZİNİ.....  | x     |
| 1. GİRİŞ.....   | 1     |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....  | 3     |
| 2.1. Literatür Taraması.....  | 3     |
| 2.2. Tezin Önemi ve Özgün Değeri.....   | 20    |
| 3. MATERYAL YÖNTEM.....   | 23    |
| 3.1. Dizel Enjektör Yapısı ve Mazot Deliği Geometrisi.....                            | 23    |
| 3.2. Aşındırıcı Akış ile İşleme (Abrasive Flow Machining – AFM) .....                 | 25    |
| 3.3. Nozul Yapıları ve Nozul Tasarımı.....  | 26    |
| 3.4. Enjektör Gövdesi Yakıt Deliği Temizleme Prosesi Tasarımı ve<br>Montajı.....      | 28    |
| 3.5. Enjektör Gövdesi Yakıt Deliği Akış Hacminin Oluşturulması.....                   | 29    |
| 3.6. Solvent/Çözücü Parametreleri ve Akış Hızının Belirlenmesi                        | 31    |
| 3.7. Enjektör Yakıt Deliği HAD Analizleri.....  | 32    |
| 3.7.1. Enjektör Yakıt Deliği Ağ Yapısının Oluşturulması.....                          | 34    |
| 3.7.2. ANSYS Fluent HAD Analizleri.....   | 38    |
| 4.BULGULAR ve TARTIŞMA.....   | 46    |
| 5. SONUÇ.....   | 69    |
| KAYNAKLAR .....   | 71    |
| EKLER.....  | 75    |
| Ek Şekil 1. 1 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış<br>karakteristiği..... | 75    |
| Ek Şekil 2. 2 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış<br>karakteristiği..... | 75    |
| Ek Şekil 3. 3 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış<br>karakteristiği..... | 76    |
| Ek Şekil 4. 4 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış<br>karakteristiği..... | 76    |
| Ek Şekil 5. 5 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış<br>karakteristiği..... | 77    |
| Ek Şekil 6. 6 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış<br>karakteristiği..... | 77    |
| Ek Şekil 7. 7 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış<br>karakteristiği..... | 78    |
| Ek Şekil 8. 8 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış<br>karakteristiği..... | 78    |

|  |    |
|--|----|
| Ek Şekil 9. 9 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış karakteristiği..... | 79 |
| ÖZGEÇMİŞ.....  | 80 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| <b>Simgeler</b> | <b>Açıklama</b>                  |
|-----------------|----------------------------------|
| $\Delta t$      | Zaman Adımı (s)                  |
| $Re$            | Reynolds Sayısı                  |
| $\Delta$        | Değişim Miktarı (m)              |
| $H$             | Yükseklik (m)                    |
| $\tau$          | Gerilme Tensörü                  |
| $\dot{\gamma}$  | Kayma Hızı ( $s^{-1}$ )          |
| $\mu$           | Dinamik Viskozite (Pa.s)         |
| $n$             | Power-Law Endeksi                |
| $\lambda$       | Zaman Sabiti (s)                 |
| $\rho$          | Statik Yoğunluk ( $kg/m^3$ )     |
| $u$             | X-Ekseni Hız bileşeni            |
| $v$             | Y-Ekseni Hız Bileşeni            |
| $w$             | Z-Ekseni Hız Bileşeni            |
| $P$             | Statik Basınç (Pa)               |
| $g$             | Yerçekimi İvmesi ( $m/s^2$ )     |
| $Ym$            | Dağılım Oranı                    |
| $G$             | Türbülans kinetik enerji üretimi |
| $\sigma_k$      | Türbülans plandtl numarası       |
| $\mu_t$         | Türbülans Viskozitesi            |
| $C_\mu$         | Sabit Katsayı                    |
| $k$             | Türbülans Kinetik Enerjisi       |
| $\varepsilon$   | Yayımla Hızı ( $m^2/s^3$ )       |
| $S/N$           | Sinyal-Gürültü Yayımla Oranı     |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                        |
|--------------------|--|
| AFM                | Abrasive Flow Machining                |
| ANOVA              | Valyans Analizi                        |
| VOF                | Uygulanan Sıvı Hacmi (Volume of Fluid) |
| TGA                | Termogravimetrik Analiz                |
| DDS                | Veri Bağımlı Sistemler                 |
| DEM                | Discrete Element Metodu                |
| PPT                | Piezoelectric Pressure Transducer      |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Şekil 3.1. Dizel enjektör gövdesi.....   | 24           |
| Şekil 3.2. Dizel enjektör yakıt deliği kesit görünüşü.....   | 25           |
| Şekil 3.3. AFM macunu.....   | 26           |
| Şekil 3.4. Nozul sistemi bileşenleri. A) Nozul montajı B) Nozul bağlantı<br>aparatu C) Esnek nozul tasarımı.....   | 27           |
| Şekil 3.5. Mazot çıkış deliği nozul tasarımı.....  | 27           |
| Şekil 3.6. Yakıt deliği temizleme tasarımı.....  | 28           |
| Şekil 3.7. Yakıt deliği temizleme tasarımı akış hacmi.....   | 29           |
| Şekil 3.8. Dizel enjektör yakıt deliği 2D yapısı.....  | 30           |
| Şekil 3.9. Dizel enjektör deliği akış hacmi.....   | 30           |
| Şekil 3.10. Taguchi deney tasarımındaki 9 seviye kombinasyonuna ait 1<br>nolu akış hacmi tasarımları.....  | 34           |
| Şekil 3.11. Taguchi deney tasarımındaki 9 seviye kombinasyonuna ait 1<br>nolu akış hacmi, inlet ve outlet bölgeleri.....   | 35           |
| Şekil 3.12. Taguchi deney tasarımındaki 9 seviye kombinasyonuna ait 1<br>nolu tasarım ağ oluşturma parametreleri.....  | 35           |
| Şekil 3.13. 1 nolu model ait 3 boyutlu HAD analizleri için oluşturulan ağ<br>yapısı.....   | 36           |
| Şekil 3.14. 1 nolu model girişe inlet bölgesine ait 3 boyutlu HAD analizleri<br>için oluşturulan ağ yapısı.....  | 37           |
| Şekil 3.15. 1 nolu model inflation ağ yapısı.....  | 37           |
| Şekil 3.16. HAD analizleri “Volume of Fluid” model faz seçimi.....   | 40           |
| Şekil 3.17. 1 nolu model giriş ve çıkış vektörleri.....  | 42           |
| Şekil 3.18. 1 nolu model hız giriş sınır şartı.....  | 43           |
| Şekil 3.19. HAD analizleri birleşik hız ve basınç denklemleri modülü.....  | 44           |
| Şekil 3.20. Öncül HAD analiz sonuçları.....  | 45           |
| Şekil 4.1. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 1 nolu seviye<br>kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas<br>bölgesi akış durumu.....                                      | 46           |
| Şekil 4.2. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 1 nolu seviye<br>kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)<br>t=0,35, b) t=0,70 ve c) t=2,00 s zamanındaki durumlar..... | 47           |
| Şekil 4.3. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 2 nolu seviye<br>kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)<br>t=0,35, b) t=0,70 ve c) t=2,00 s zamanındaki durumlar..... | 48           |
| Şekil 4.4. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 3 nolu seviye<br>kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)<br>t=0,35, b) t=0,70 ve c) t=2,00 s zamanındaki durumlar..... | 49           |
| Şekil 4.5. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 4 nolu seviye<br>kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)<br>t=0,35, b) t=0,70 ve c) t=2,00 s zamanındaki durumlar..... | 50           |
| Şekil 4.6. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 5 nolu seviye<br>kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)<br>t=0,35, b) t=0,70 ve c) t=2,00 s zamanındaki durumlar..... | 51           |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.7. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 6 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a) $t=0,35$ , b) $t=0,70$ ve c) $t=2,00$ s zamanındaki durumlar.....  | 52 |
| Şekil 4.8. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 7 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a) $t=0,35$ , b) $t=0,70$ ve c) $t=2,00$ s zamanındaki durumlar.....  | 53 |
| Şekil 4.9. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 8 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a) $t=0,35$ , b) $t=0,70$ ve c) $t=2,00$ s zamanındaki durumlar.....  | 54 |
| Şekil 4.10. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 9 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a) $t=0,35$ , b) $t=0,70$ ve c) $t=2,00$ s zamanındaki durumlar..... | 55 |
| Şekil 4.11. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 9 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu delik içi akış hızı görseli.....                                      | 56 |
| Şekil 4.12. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 2 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu.....   | 56 |
| Şekil 4.13. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 3 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu.....   | 57 |
| Şekil 4.14. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 4 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu.....   | 57 |
| Şekil 4.15. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 5 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu.....   | 58 |
| Şekil 4.16. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 6 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu.....   | 58 |
| Şekil 4.17. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 7 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde $t=0,70$ s anındaki temas bölgesi akış durumu.....                         | 59 |
| Şekil 4.18. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 8 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde $t=0,70$ s anındaki temas bölgesi akış durumu.....                         | 59 |
| Şekil 4.19. Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 9 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde $t=2,00$ s anındaki temas bölgesi akış durumu.....                         | 60 |
| Şekil 4.20. İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 1 nolu hava uygulaması a) $t=0,18$ , b) $t=0,36$ , c) $t=0,70$ ve d) $t=1,80$ s aralıklarındaki akış karakteri.....            | 61 |
| Şekil 4.21. İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 1 nolu hava uygulaması $t=0,9$ s anında 3 boyutlu analiz.....  | 62 |
| Şekil 4.22. İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 1 nolu hava uygulaması $t=1,80$ s anında 3 boyutlu analiz.....   | 62 |
| Şekil 4.23. İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 2 nolu hava uygulaması $t=1,50$ s anında 2 boyutlu analiz.....   | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.24. İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 3 nolu hava uygulaması $t=0,15$ s anında 2 boyutlu analiz..... | 63 |
| Şekil 4.25. İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 3 nolu hava uygulaması $t=0,40$ s anında 2 boyutlu analiz..... | 64 |
| Şekil 4.26. Parametrelerin S/N oranına etkisinin grafiksel gösterimi.....  | 67 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|   | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| Çizelge 3.1. Delik içi yüzeyi temizlemek amacıyla seçilen kimyasal solvent/Çözücü Tablosu.....  | 31           |
| Çizelge 3.2. Akışkan Giriş Hızı Tablosu.....  | 32           |
| Çizelge 3.3. Lüle tasarımını optimize edilmesi amacıyla oluşturulan Taguchi'nin L9(3)3 deney tasarımına ait seviye kombinasyonları.....                             | 33           |
| Çizelge 3.4. İkinci aşama tasarım tablosu.....  | 33           |
| Çizelge 3.5. Ağ yapıları eleman sayıları, Skewness (Çarpıklık Değeri) ve Ortogonal Değer Tablosu.....   | 38           |
| Çizelge 4.1. Taguchi'nin L9(3)3 deney tasarımıyla gerçekleştirilen HAD analizleri sonuç tablosu.....  | 64           |
| Çizelge 4.2. Solvent/çözücü ile gerçekleştirilen HAD analizleri sonucu elde edilen gürültü oranı tablosu.....   | 66           |
| Çizelge 4.3. Enjektör gövdesi yakıt deliği temizleme performansına etki eden parametrelerin Kalıntı AFM Macunu üzerindeki etki sıralaması (En Düşük – En İyi) ..... | 66           |
| Çizelge 4.4. Enjektör gövdesi yakıt deliği temizleme performansında etki eden parametrelerin etki yüzdeleri.....  | 67           |
| Çizelge 4.5. Enjektör gövdesi yakıt deliği temizleme performansına etki eden parametrelerin optimal seviye kombinasyonu.....  | 68           |

## 1.GİRİŞ

Dizel yakıtla çalışan araçlar ve dizel yakıt tüketimli motorları dünya genelindeki otomotiv sanayisi içerisinde önemli bir yere sahiptir. Teknolojinin gelişimi ile birlikte dizel motor performanslarının artırılması yanında silindir içindeki yanma verimliliğinin ve emisyon değerlerinin etkilenmesine yol açmıştır. Söz konusu değerleri en iyi şekilde yönlendirmek için dizel yakıt enjektörlerinin tasarım ve imalat süreçlerini çok daha detaylı olarak ele alınır bir noktaya taşınmıştır.

Dizel yakıt enjektörlerinde, yakıtın enjektör çıkışı sonrasındaki atomizasyon, pulverizasyon ve silindir içindeki konik bulut formunu alması üzerindeki etken parametrelerin çok daha hassas belirleniyor oluşu enjektör içinde yakıtın sevk edildiği akış hattının da önemini daha kritik bir noktaya taşımıştır. İtten yanmalı motor teknolojilerinde tasarım detaylarının ve toleransların hassaslaşması beraberinde geometrik ölçülerin de küçülmesine neden olmaktadır.

Dizel enjektör yakıt delikleri geleneksel delik delme (drilling) prosesi ile açılmaktadır. Bu imalat süreci sonrasında delik yüzeyinde kalan çapak ve olası pürüzlülüklerin giderilmesine yönelik olarak da geleneksel olamayan Aşındırıcı Akış ile İşleme (Abrasive Flow Machining- AFM) prosesi uygulanmaktadır. Bu işlem aşındırma özelliğine haiz, aşındırıcı tanecikler içeren, bir macunun (AFM macunu) delik içinden geçirilmesi prensibi üzerine kurulmuştur.

Uygulanan AFM prosesi sonrasında mazot deliği yüzeylerinde veya delik hacminde bir miktar AFM macun birikintisi kalabilmektedir. Belirtilen durum sonrası deliğin macundan, macunun kendisinden gelen taneciklerden ve aşındırma işlemi sırasında delik yüzeylerinden kaldırılan partiküllerden temizlenmesi de önemli bir zorunluluk olarak kendisini göstermektedir. Deliğin istenen temizlik kriterlerini sağlamaması halinde çalışma performansına istenmeyen sorunların oluşmasına neden olmaktadır. Bahsi geçen sorunun aşılması için Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş ve Bursa Uludağ Üniversitesi ile birlikte TÜBİTAK 1505 projesi kapsamında dizel



enjektör yakıt deliğinin aşındırıcı talaşlı işleme sonrasında bir temizleme prosesi hedeflenmiş ve bu proseslere uygun 3 aşamalı bir temizleme makinesi imal edilmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan ve imal edilen AFM temizleme sistemi 3 aşamalı gerçekleşmektedir. İlk aşaması sürekli hava ile delik içerisindeki macunun delik içerisinden uzaklaştırılmasıdır. İkinci aşamada ise delik yüzeyinde kalan macun kalıntılarının darbeli hava ile aşındırılarak delik içerisinden uzaklaştırılmaktadır. Son aşamada ise ilk iki aşama sonrası delik yüzeyinde kalabilecek aşındırıcı partikül, macun ve talaşların solvent/çözücü ile delik yüzeyinden uzaklaştırılarak deliğin tam temizlik koşullarını sağlaması şeklinde oluşmaktadır.

Yapılmak istenen bu tez çalışmasında, yukarıda belirtilen nedenlerde ve amaçlarda sunulduğu üzere bahsi geçen üç aşamalı temizleme prosesinin son aşaması olan sıkıştırılmaz akış (sıvı) ile sıkıştırılabilir akış (hava) jet akışı formunda yürütülen temizlik prosesinin nümerik olarak incelenerek proses için gerekli optimum parametreleri ve yöntemlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada, 3 farklı girdi belirlenmiştir. İlk girdi yakıt deliğinin özellikleri ve ölçüleri göz önüne alınarak çeşitli literatür incelemeleri ile birlikte farklı çap ölçülerine sahip üç farklı nozul tipinin üç boyutlu modellenmesi oluşturulmuştur. İkinci aşamada delik içi temizlikte kullanılacak farklı yoğunluk ve viskozite değerlerine sahip solvent/çözümler seçilmiştir. Seçilen solvent/çözümler endüstride yaygın kullanılan kimyasallardan olmasına dikkat edilmiştir. Son olarak literatür araştırmaları sonucu delik içerisine uygulanacak solvent ve hava debi değerleri seçilmiştir. Oluşturulan Taguchi deney tasarımı tablosu ile oluşturulan 9 model üzerinde ANSYS Fluent programı kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen veriler sayesinde delik içerisinde gerçekleşen akışın karakteri, delik içerisinde akışın tam etki gösterip göstermediği, tüm yüzeylere temas edip etmediği belirlenmiştir. Proses için iki önemli çıktı olan zaman ve akışkanın delik içerisinden çıkış hızı aralıkları belirmemiştir. Çalışmada delik çapı 2 mm altında olan deliklerde hava jeti uygulamasının davranışları nümerik olarak incelenmiş ve benzer problemlere çözüm sunması amaçlanmıştır.

## 2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Literatür Taraması

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında tez konusu ile alakalı literatürde yer alan çalışmalar derlenmiş ve özet olarak sunulmuştur.

Qu ve ark. (2019) delik açma operasyonu sonrasında delik içerisinde kalan talaş partiküllerinin delik içerisinden temizlenmesine yönelik bir proses geliştirilmesi ve bu prosesin nümerik olarak inceleme altına almışlardır. Sayısal çözümlerinde finite volume tekniği kullanılmıştır ve Averaged Navier-Stokes Modeli ve Realizable k- $\epsilon$  Türbülans Modeli, analiz edilmiştir. Delik içerisinde sıvı hareketine açışal yönde hız kazanmasını sağlamak amacıyla akış yönlendiriciler kullanılmıştır. Delik içerisindeki sıvının kazandığı momentum swirl sayısı ile karakterize edilirken açışal ve teğetsel hız dağılımları ile girdap oluşumları inceleme altına alınmıştır. Swirl sayısının delik içerisindeki koordinat bazlı değişimleri tespit edilerek bölgesel temizleme performansları üzerine yorumlar yapılmıştır.

Delik içerisinde temizleme operasyonunu inceleyen bir başka çalışma ise Dong ve ark. (2016) tarafından nümerik olarak yürütülmüştür. Yapılan çalışmada süreklilik ve momentum denklemleri 2-boyutlu akış alanı için ANSYS Fluent yazılımı ile çözdürmüşlerdir. Araştırma amacı delik içerisinde negatif basınç alanı oluşturarak delik yüzeyindeki kalıntıların emilmesidir ve bu çalışmada ana bulgular delik içerisinde temizleme sıvısının hız ve basınç dağılımları olarak ifade edilmiştir. Negatif basınç değerlerinin alan üzerinde integrasyonu neticesinde emiş kuvveti elde edilmiştir.

Yeu ve ark. (2019) da delik açma operasyonu üzerinde yürütülen bir başka çalışmada, delik içerisinde kalan talaş birikintisinin önemi vurgulanmıştır. Deneysel olarak yürütülen çalışmada, deliğin yönü ve açısının temizlik operasyonu üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Delik içerisini temizleyecek sıvının debisinin ve talaşlar üzerindeki itiş kuvveti etkisinin de önemli olduğunu kayıt altına alındığı çalışmada

debi, kuvvet ve eğim parametrelerinin odağında delik içerisindeki talaş birikintisinin temizlik oranı bulguları ortaya konmuştur.

Khatibi ve ark. (2018) tarafından deneysel olarak yapılan çalışmada, boru içi partiküllerin farklı özellikteki sıvılar ile temizlemesi incelenmiştir. Deneylede incelenen parametreler sıvıların debisi sıvı hızları ve temizlenecek partikül ebatları ve partikül konsantrasyonlarıdır. Deneyleler akışın -gözlemlenebileceği şeffaf borular kullanılmıştır. Elde edilen görsel tespitlerde Basler (A800-510) marka renkli kamera (500 fps at full resolution 800x600 pixels) ile yürütülürken akışkan transportu sırasında meydana gelen basınç kayıpları Rosemount 3051S transducer ile kayıt altına alınmıştır. Araştırmanın ana bulgusu temizleme sıvısının partikül taşıma kapasitesi olarak ifade edilmiştir.

Akhshik ve ark. (2015) araştırmasında partikül şekillerinin temizlik performansına etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Discrete Element Metodu'nun (DEM) kullanıldığı araştırmada küresel, kübik ve disk şeklindeki partiküller üzerinde inceleme yapılmıştır. Araştırmada başlangıç durumunda birikinti halindeki partiküllerin zaman içinde temizleme sıvısı etkisi ile boru içerisindeki dağılımları ve bölgesel konsantrasyonları tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu incelemelerde partiküllerin kendi aralarında çarpılma kinematiği de incelenmiştir.

Gıda endüstrisine yönelik bir araştırmada Helbig ve ark. (2019) kanallar içindeki yumurta birikintilerinin temizleme prosesi üzerine çalışmışlardır. Araştırmada temizlik kalitesi ve süresinin temizlik sıvısının sıcaklık ve uygulama basıncı ile doğrudan bağlantılı olduğu belirlenmiştir.

Buhar santrallerinde buhar hatlarının temizlenmesine üzerine çalışma yapan Jarvis ve ark. (2017), Buhar hatlarının temizlenmesinde sıvı buharı kullanımının en yaygın yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Temizleme sıvısının hava olmasının maliyetler üzerinde olumlu etkisi olduğunu belirtilmiştir. Proses borularının temizlik analizlerinde genel metodolojinin yanında gerekli ek hesaplamalar ve hususlarında gerekliliği kanaatine varmışlardır. Bu kapsamda buhar darbeleri yerine hava darbelerinin

uygulanması ile yakıt tasarrufu, su tasarrufu, potansiyel program tasarrufu sağlayabileceği ve su darbe risklerini azaltabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Önceden ıslatılmış bir toprağın temizleme davranışını Joppa ve ark. (2017) tarafından deneysel olarak incelenmiş ve düzlem kanal akışının prototipik durumunu sayısal olarak modellenmiştir. Kanal duvarlarından biri, temizleme işleminin uzay ve zamanla çözümlenmiş incelemelerini gerçekleştirmek için ışıldayan iz parçacıkları içeren gıda bazlı bir model toprakla kirlenmiştir. Ön ıslatma, 20000'e kadar Reynolds sayısının akışı ile toprak kaldırmaya başlamadan önce birkaç dakika uygulanmıştır. Fiziksel model ve simülasyonun, toprağın davranışını temsil etmek için geçici bir sınır koşuluna dayandığı belirtilmiştir. Ön ıslatma, kohezif ayırma nedeniyle belirli bir miktarda kirin ilk çıkarılmasıyla hesaba katılmış ve sonraki temizlik, difüzyon bir işlemle sınırlı olacak şekilde modellenmiştir. Bu yaklaşım, hesaplama süresini geleneksel çok fazlı simülasyona kıyasla yaklaşık üç büyüklük sırasına göre azaltmıştır. Ayrıca bu temel yaklaşımla elde edilen simülasyon sonuçlarının, deneysel temizleme verileri ile karşılaştırıcı derecede iyi eşleştiği bulgularını ortaya koymuşlardır.

Gıda endüstrisinde kullanılan cihazların ve bağlantı hatlarının genel olarak yerinde temizlendiği belirtilmiştir. Stepuk ve ark. (2016) bu temizleme işlemlerinde yüksek enerji tüketimi, su tüketimi ve kimyasal tüketimi ile yapıldığı bilinmektedir. Çalışma kapsamında temizleme sürecindeki enerji tasarrufunu en aza indirmek ve fiziksel faktörleri en aza indirmek amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada incelenen değişkenler akış hızı, basınç, sıcaklık ve temizleme süreleridir. Deneysel tasarım tekniği kullanarak bir dizi deneysel sonuç elde edilmiş ve gözlemlenen sonuçlarda en az enerji sarfiyatı ile en iyi temizleme oranına dikkat edilmiştir. Ayrıca temizleme koşullarının polioptimal bir modelini geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar, yerinde temizleme sisteminin etkinliğinin ekolojik yönünden önemli olduğunu ve analiz edilen nesnelerin temizlik programlarının geliştirilmesi için gerçek koşullarda uygulanabilir olduğunu belirtilmiştir.

Li ve ark. (2006) çalışmasında gelişmiş petrol üretimi ve gelişmiş su enjeksiyonu için kombine yüksek basınç su jeti ve perforasyon deliğinin asitlenme işlemini ve kuyu

deliğine yakın oluşum mekanizmaları ve uygulamaları araştırılmıştır. Birden çok petrol kuyusu ve su enjeksiyon kuyusu üzerinde saha uygulama sonuçları, bu teknolojinin prosedürde basit ve beklenenden daha başarılı olduğu, geniş fizibiliteye ve üretkenliği iyileştirmek için belirgin etkinliğe sahip olduğunu gösterdiğini belirtmiştir.

Joppa ve ark. (2017) çalışmasında ıslatma süresine bağlı fiziksel özellik içeren bir toprağın temizleme prosesini, yerel fosforesans algılama yöntemi ile deneysel olarak çalışmış ve 30.000'e kadar Reynolds sayıları için tam gelişmiş düzlem kanal akışında nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan modellenmiş çalışmada toprağın akış üzerindeki etkisi ihmal edilmiş ve toprağın temizleme sırasındaki geçici davranışını, geçici bir Dirichlet sınır koşulu şeklinde modellenmiştir. Bu yaklaşımın Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (HAD) için yenilikçi bir yöntem olduğunu belirterek deneyden model parametrelerinin belirleme yolu açıklanmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, modelin toprağın nişasta durumundaki uygunluğunun çok iyi olduğunu sonucuna ulaşıldığı ifade edilmiştir.

Su enjeksiyonunun şu anda çeşitli toprak koşullarında kazık kurulum direncini azaltmak için kullanıldığı Shepley ve ark. (2014) tarafından ortaya konmuştur. Bununla birlikte, yük azaltmayı yöneten mekanizmaların belirsizliğini koruduğunu ve su enjeksiyonunun kurulu kazığın uzun vadeli davranışı üzerindeki etkisine ilişkin belirsizliklerin var olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında, kurulum mekanizmasını açıklığa kavuşturmak amacıyla santrifüj model testlerine dayalı bazı bilgiler sunmuştur. Ölçeklendirmeye yeni bir yaklaşım gerekli olduğunu ve parçacık boyutunun artan yerçekimi ile ölçeklendiğini kabul etmiştir. Ayrıca üç aşamalı değişken geçirgenlik mekanizması önerilmiş ve bir dizi aletli kazık kurulumuna karşı doğrulanmıştır. Farklı enjeksiyon etkilerini araştırmak için farklı akış hızları ve enjeksiyon geometrileri kullanılarak çeşitli kazık kurulumlarını tamamlamıştır. İki kazık yarıçapına uzanan, kazık ucu çevresinde akışkan bir bölge oluşturularak taban direnci ortadan kaldırılmıştır. Sonuç olarak, akışkan halde kritik bir montaj derinliğinin ötesinde sürdürülemediği ve daha sonra taban direncinin arttığı bulgularına ulaşılmıştır.

Lu ve ark. (2003) gerçekleştirdikleri çalışmada yağ yakıtlı bir kazanın partikül emisyonunu kontrol etmek için pilot ölçekli bir darbeli-jet torba uygulaması kullanılmıştır. Filtrasyon hızı, başlangıç tankı basıncı ve nozul çapı gibi çalışma ve tasarım parametreleri, darbeli jet torbasının temizleme etkisini değerlendirmek için değişmiştir. İki farklı temizlik türünden bahsedilmiştir; 1-) yüksek başlangıç tankı basıncı ve bir torba temizleme ve 2-) torba temizleme performansını karşılaştırmak için düşük başlangıç tankı basıncı ve iki ardışık torba temizliği kullanılmıştır. Temizleme etkisinin tankın başlangıç basıncı ile arttığı bulunmuştur. Ancak, temizleme yoğunluğu aşırı basınç altında nozul çapı ile artmadığı ifade edilmiştir. Daha yüksek temizleme yoğunluğu ve daha iyi bir temizleme etkisi elde etmek için optimum bir nozul çapı vardır. Endüstriyel boyutta bir torba kullanılıyorsa, daha yüksek bir temizleme etkisi elde etmek için 13 mm'den daha büyük bir nozul çapının ve 2,5 kg/cm<sup>2</sup>'den daha büyük bir başlangıç tank basıncının benimsenmesi gerektiğini göstermektedir. İki temizleme tipi arasında, tip 2'nin torbayı temizlemek için daha etkili olduğu ve basınçlı hava için enerji tüketiminin tip 1'den önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur. Bu nedenle, tip 2 torba temizliğinin torbayı temizlemek için daha iyi bir yöntem olması önerilmiştir.

Leubner ve Riebel (2004) bu çalışmalarında teknik filtre evlerinde ve test kulelerinde tekstil ve sert filtre ortamlarının darbe temizliğini karakterize etmek için, şu ana kadar esas olarak tank basıncı ve valf açma süresini karakteristik parametreler olarak kullanmışlardır. Bununla birlikte oluşan basınç darbesi, tesisin tüm geometrisine bağlıdır, Çalışma parametreleri farklı teknik sistemler arasında bir karşılaştırmaya izin vermemektedir. Bu nedenle, yeni darbeli jet sistemlerinin geliştirilmesi içinde oluşan sorular ortaya çıkmakta ve darbeli bir temizleme parametrelerinin performansı için belirleyici olacaktır. Bu parametreleri bilerek, deneysel bir kurulum, bir filtre evi ile aynı temizleme davranışını gösterecek şekilde ayarlanabilir, Parametrelerin temizleme davranışı üzerindeki etkisi ile ilgili deneyler yapılmıştır. Biçimli üfleme borusuna farklı delikler yerleştirilerek ve tank basıncını ve valf açma süresini değiştirerek, büyük değişkenlikteki temizleme darbeleri üretilmiştir ve filtre ortamı üzerinde veya filtre yüzeyinde bile basınç düşüşü geçmişi kaydedilmiştir. Performans parametreleri maksimum basınç, basınç integrali ve her bir basınç darbesinin basınç yükselme hızı olarak belirlenmiş olup elde edilen temizleme verimliliği ile karşılaştırılmıştır.

Kapsamlı regresyon sonucu olarak- temizleme darbesinin sıfır geçişi sırasında özellikle maksimum basınç ve basınç artış hızının temizleme sonucu için belirleyici olduğunu bulmuşlardır. Deneyle sonuçunda, darbeli jet sistemlerinin bu parametrelere göre optimize edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, basınç integralinin önemli bir performans parametresi olmadığı çalışmada vurgulanmıştır.

Yan ve ark. (2013) çalışmalarında, filtre kartuşlarının statik basınç dağılımını incelemişlerdir ve özellikle daha az statik basıncın sistematik dengesiz operasyonlara neden olabileceği söylenmiş olup bir filtre kartuşunun üst kısmında eksik temizleme sıklığının azaltılması çalışılmıştır. Darbe jeti temizleme işlemi sırasında toz toplayıcıdaki pileli filtre kartuşlarında basınç kaybı ve statik basınç davranışı gözlenmiştir. Pileli filtrelerin anlık basınç düşüşleri ölçülmüş ve filtrenin zaman içinde yaşlanması kaydedilmiştir. Pileli filtrelerin basınç düşüşleri indüklenen hava akımları, indüklenen hava akımları olmayanlardan daha az önemli olduğu söylenmiştir. Filtre kartuşlarının yüzeylerindeki statik basınç ve sürekli basınç süresi bir basınç sensörü kullanılarak elde edilmiştir. İndüklenen hava akımı, filtre kartuşunun yüzeyi boyunca statik basınç dağılımını değiştirmek için kullanılmıştır. Havanın aksel hızı, süpersonik indüklenen nozuldan ve hava difüzöründen kademeli olarak azalmıştır. Aksi takdirde, filtre kartuşunun yüzeyi ile çarpışmadan önce radyal hızının arttığı söylenmiş ve dinamik basınç hızla filtre kartuşunun üst kısmındaki statik basınç yarattığına değinilmiştir. Filtre kartuşunun ortasına ve daha sonra hemen altına deneysel sistem taşınmıştır. Deneysel sonuçlar, filtre kartuşlarının üst kısmındaki statik basıncın 23-17 kPa olduğunu ve filtrenin alt kısmındaki statik basıncın olduğunu göstermektedir. Kartuşlar, deneyde 0.6 MPa tank basıncı ile çalışma süresi boyunca 4.7-1.6 kPa' tır. Bu varyasyon, filtre kartuşunun üst kısmındaki temizleme zorluğunu ortadan kaldırmış ve tüm sistematik sürdürülebilir çalışmayı ortayı çıkartmıştır.

Darbeli/pulseli temizlik işlemindeki önemli parametreleri akışın kinetik enerjisi ile basınç düzeyi olarak tanımlayan Cai ve ark. (2017) bu parametrelerin uygulama bazlı belirlenmesinin gereğini işaret etmişlerdir. Nümerik olarak yürüttükleri araştırmada temizlik bölgesindeki maksimum basıncı arttırmada kullanılacak lülenin geometrisinin de etkili olduğu belirtilerek farklı operatif ve yapısal senaryolar için analizler

yürütülmüştür. Bulgular temizlik bölgesindeki hız ve basınç dağılımları tipinde sunulmuştur.

Filtrasyon kartuşlarının pulseli/darbeleri akış ile temizlenme performansının artırılması üzerine çalışan Li ve ark. (2018) deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Kartuşların temizlenmesindeki ana sorunun homojenlik sağlanmasında olduğunun ifade edildiği çalışmada temizlik üzerinde etken parametrelerin enjeksiyon deliğinin çapı, enjeksiyon delik sayısı, jet-kartuş mesafesi ve basınç seviyesi olarak ortaya konmuştur. Uygun konfigürasyonun temizlik yapılacak fiziki sisteme göre belirlenmesinin gerektiğinin işaret edildiği çalışmada basıncın zamana bağlı değişimlerinin hassas olarak kayıt altına alınmasına yönelik olarak MYD-1540C Piezoelectric Pressure Transducer (PPT) kullanılmıştır.

Yüksek kıvrım oranlarına ve geniş filtre yüzeyine sahip pileli filtre kartuşlarının, yamalı eğimin dikkat çekici örneklerine sahip olduğu Li ve ark. (2019) tarafından tespit edilmiştir. Filtre temizliğinin yoğunluğunu ve tekdüzeliğini arttırmak için, bu çalışmada yeni bir çarpışan darbeleri jet temizleme yöntemi tasarlanmış ve test edilmiştir. Deneysel bir darbeleri jet temizleme toz toplayıcı (filtrasyon odası  $1225 \times 750 \times 1000$  mm'dir. Filtre kartuşunun üzerine ( $20320 \times 2240 \times 660$  mm) ve kartuşun altına monte edilmiş iki nozul ile inşa edilmiştir. Çıkış basıncı, darbe jet performansı (yoğunluk ve tekdüzelik) ve basınçlı hava tüketimi incelenmiştir. Üst ve alt darbe jetleri arasındaki tetik zaman farkının performans üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, zamana bağlı olmayan çarpışan pulse-jet modunun, pulse-jet yoğunluğunu, daha fazla hava tüketimine sahip olan top-jet-only moduna kıyasla 2,56 katına çıkardığını göstermiş olup (topjet-only modundakinden yaklaşık 1,85 kat daha fazla), ancak pulse-jet homojenliğinin biraz kötüleştiği de ayrıca belirtilmiştir.

Dos Santos ve ark. (2020) da temizlik prosesinde homojenlik sorunlarından yola çıkarak nümerik bir araştırma yürütmüşlerdir. ANSYS Fluent ile ana denklem sistemi yanında SST k-ε türbülans modeli de kullanılmıştır. Yüksek basınç/debili sistemlerde vananın açılma hızının her 2 değerin de zaman içinde değişmesine neden olmasından dolayı bu çıktının pulse/darbe etkisi olarak kabul edilebileceği hem girdi hem de çıktı olarak ifade



edilmiştir. Hava jetinin dağılmadan temizlik bölgesine yönlendirilmesinin önemine vurgu yapılan araştırmada nümerik bulgulardan yola çıkılarak jet merkezi ile merkezden radyal yöndeki debi-basınç değişimleri tespit edilmiş ve bölgesel temizleme performansına dair yorumlar yapılmıştır.

Wu ve ark. (2020) filtrasyon işleminde kullanılan bir kartuşun pulseli/darbeleri akış ile temizlenmesi prosesini nümerik olarak inceleme altına almışlardır. ANSYS Fluent ile yürütülen simülasyon çalışmalarında Süreklilik ve Navier-Stokes Denklemleri çözülürken analizler süreksiz rejimde gerçekleştirilmiştir. Zaman adımı  $\Delta t=0.0002$  s seçilerek akışın basınç değişim karakteri için analitik tanımlamalar yapılmıştır. Bulgular zamana bağlı olarak kartuş içindeki basınç dağılımları, akış çizgileri ile maksimum basınç değerleri cinsinden verilmiştir.

Su ve ark. (2005) aktif elektrikli ısıtmaya sahip sandviç boru hatlarında geçici ısı transferinin bir analizini yürütmüşlerdir. Kompozit boru hattındaki ısı iletimini ve üretilen akışkandaki enerji taşınımını yöneten matematiksel modeller sonlu fark yöntemleri kullanılarak çözülmüştür. Tipik üretim koşulları altında üç sandviç boru hattı konfigürasyonu için soğutmanın hesaplamalı simülasyonunun sayısal sonuçları sunulmuştur. Analiz, aktif ısıtmalı sandviç borunun, plansız ve uzun süreli soğutma koşullarında bile ultra derin su yağı üretiminin ciddi akış güvence gereksinimlerini karşılamak için uygun bir çözüm olduğunu göstermiştir. Sandviç boru hatlarının ısı yalıtım malzemesi olarak polipropilen ile soğutulması sırasında geçici termal olayların hesaplamalı simülasyonu sunulmuştur. Söz konusu üç boru hattı konfigürasyonu için, sayısal sonuçlar, pasif ısı yalıtımının kararlı üretim koşulları için yeterli olmasına rağmen, planlı veya plansız soğutma sırasında aktif ısıtmanın gerekli olduğunu göstermiştir.

Kaldırımlar üzerinde biriken karı eritmek üzere kaldırımın altına yerleştirilen elektrikli ısıtıcıların optimizasyonuna yönelik nümerik araştırma Liu ve ark. (2017) tarafından yürütülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ABAQUS yazılımı ile yürütülen simülasyonlarda elektrikli ısıtıcıların dış yüzeye doğru ve aralarındaki mesafe ile

elektrik gücü girdi parametreleri olarak tanımlanmıştır. 3 Boyutlu sıcaklık haritalarının çıkarıldığı araştırmada analizler süresiz rejimde yürütülmüştür.

Cunill ve ark. (1997) çok seyreltik organik bileşiklerin, özellikle eten, propan ve bunların karışımlarının ototermal yanması için, dahili bir elektrikli ısıtıcı ile donatılmış ters akış reaktörünün deneysel çalışmasını yapmışlardır. Bu çalışmada elektrikli ısıtıcı gücü, çevrim süresi, kimyasal karakter ve kirleticilerin konsantrasyonu gibi çeşitli çalışma parametrelerinin etkisi maksimum sıcaklık ve sabit durumdaki sıcaklık profillerinin şekli tartışılmaktadır. Deneysel sonuçlar, dahili bir elektrikli ısıtıcının, sadece kendi başlarına bir ototermal işlemi sürdüremeyen tamamen çok yağsız karışımları oksitlemek için başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Uyum parametreleri kullanılmadan heterojen tek boyutlu bir modelle yapılan tahminler, kritik durumlar dışında deneylerle iyi bir uyum göstermektedir.

Katı yüzeyin elektrikle ısıtılması sonrasında yüzeyin alt kısmındaki akışkan hareketinin ısıl mekanizmaları Krol ve ark. (2011) tarafından deneysel olarak inceleme altına alınmıştır. Sıcaklığın 50 °C'ye kadar yükseltildiği deneylerde sıcaklık ölçümleri ısı-çiftler ile yürütülürken akışkanın termo-fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin de dikkate alınmasının gereğine vurgu yapılmıştır.

Wang ve ark. (2018) enjeksiyon döküm teknolojisinde sıcaklığın hızlı ve homojen artırılmasının ürün kalitesi üzerindeki etkisinden yola çıkarak bu amaca yönelik bir araştırma yürütmüşlerdir. Elektrikli ısıtma sisteminin kullanıldığı araştırmada etken girdi parametresi elektrik gücü olarak tanımlanırken çıktılar ısınma hızı ve sıcaklık homojenliği olarak ifade edilmiştir.

Benzer bir kalıp ısıtma uygulamasında indüksiyonlu ısıtma ile direkt rezistanslı ısıtma prosesleri Tanaka ve ark. (2010) tarafından mukayese edilmiştir. Malzeme ve operasyon maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı indüksiyonlu ısıtmanın avantajlı olmadığını ifade edildiği araştırmada direkt rezistanslı ısıtma ile ilgili parametreler elektrik gücü ve ısınma hızı olarak tanımlanmıştır.

Korolev (2001) elektrodinamik kuvvetin kanalın sürüklenmesi üzerindeki etkisini araştırmak için, giriş sıcaklığı 8-13°C olan ve ısı akısı açık olan aynı kanaldan su geçirmiştir. Kanal duvarları boyunca ısı akısı gücü arttıkça sürtünmenin sürekli olarak azalmaya eğilimli olduğunu göstermiştir (sürtünmenin maksimum azalması yaklaşık 160 kPa'lık bir akımla %23' tür). Hidrolik direnç, kanaldaki aritmetik ortalama sıcaklığa karşılık gelen su parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır. Kanala yerleştirilen gösterge, kanal duvarının salınımlarının genliğinde 20-30 µm'ye kadar bir artış göstermiş ve akım gücü 160 A'ya yükselmiştir. Bununla birlikte, bu veriler, cihazın büyük zaman sabiti ve endikasyonların kararsızlığı nedeniyle makalede sunulmamıştır.

Bir elektrikli yerden ısıtma sisteminin uzun bir kanalındaki durağan bir termal alan analizi Golebiowski ve Peterson (1996) tarafından yürütölmüştür. Isıtma kablosunun paralel sektörleri ısı kaynaklarından yayılan gücü doğrusal yoğunluğu ile modellemişlerdir. Elde edilen termal alan, ikinci ve üçüncü tür sınır koşullarına sahip, eliptik kısmi diferansiyel denklem ile tanımlanır. Problem öz fonksiyon yöntemi ile çözülmüştür. Bu sonuçlar boyutsuz bir forma indirgenir ve sayısal olarak işlem yapılmıştır. Elde edilen alan dağılımları ısıtma kablosunun sektör sayısı ile grafiksel form değiştirilmesini göstermektedir.

Cheng ve ark. (2014) içinden akışkan geçen boruların elektrik kablo uygulaması ile ısıtılması durumunda kablonun boru yüzeyine sarım sayısının önemine vurgu yapmışlardır. Elektrik kablosunda üretilecek gücün kablo uzunluğu ile bağlantılı olmasından dolayı voltaj-akım-güç ilişkisinin belirlenmesinde kablo uzunluğunun dikkate alınmasının gereği işaret edilmiştir. Ayrıca sarım sayısının iletilecek ısı enerjisinin boru üzerindeki homojenliği üzerinde de etkili olmasından dolayı bu hususun da önemine vurgu yapılmıştır. Çerçevesi bu şekilde ifade edilebilecek araştırma ANSYS Fluent yazılımı ile yürütölmüş ve adı geçen parametrelerin karşılıklı etkileri değerlendirilmiştir.

Benhamadouche ve ark. (2017) çalışmalarında borular içindeki akışkanın hareketi sırasında basınç değişimlerini ölçmek amacıyla orifis plakası kullanılmışlardır. Çalışmada yuvarlak bir boru içerisindeki kare kenarlı bir delikten geçen akışkan hızını,

Reynolds gerilimlerini, basınç kayıplarını ve boşaltma katsayısını belirlemek için duvar çözümlenmeli Büyük Girdap Simülasyonu (LES) yaklaşımı kullanılmış olup doğruluk oranları belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan Reynolds sayısı 25.000. Orifis çapının boru çapına oranı  $\beta = 0,62$  ve orifis kalınlığının boru çapına oranı 0,11'dir. Analiz çözümleri tahmini bir Taylor mikro ölçeğine uygun sağlamak için mesh yapısındaki iyileştirmeler ön RANS sonuçlarına göre yapılmıştır. Giriş koşulu, geri dönüşüm yöntemi kullanılarak simülasyon oluşturulur ve LES, dinamik Smagorinsky alt ızgara ölçeği (SGS) modeliyle çalıştırılır. Çalışmada SGS modelinde basınç-hız bağlantısının az olduğu belirtilmiştir. LES, deneysel verileri ve ISO-5167-2 ile kıyaslanmış olup, LES deneysel verilerinde hız çıktılarının bir uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. Reynolds gerilmelerinde oluşan profiller benzer olmasının yanında çapraz gerilmelerde ise ofsetler görülmüştür. Basınç kaybı ve boşaltma katsayılarının, ISO 5167 2'nin tahminleriyle çok iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, duvar çözümlenmeli LES'in, kare kenarlı bir orifis boyunca akışı simüle etmede oldukça doğru sonuç verdiği belirtilmiştir.

Bordoloi ve ark. (2018) araştırmasında dikey ekseninde serbest bırakılan bir su damlasının yerçekimi kuvvetiyle bir delik içerisinden geçerken damla içindeki ve yüzey alanındaki hız değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmada yuvarlak ve keskin kenarlı geometrilere sahip iki delik kullanılmış olup delik yüzeyindeki hidrofobik ve hidrofilik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada damlanın yuvarlak kenarlı delikten çarparak geçmesi sırasındaki oluşan enerjinin damladaki ve çevresindeki dağılımı gözlemlenmiştir. Kırılma indiriji eşleştirme ve zamana bağlı PIV kullanılmıştır. Ölçümlerde, a) çevreleyen sıvıya aktarılan ve içinde dağılan düşme kinetik enerjisinin ve b) darbe ve delikten geçiş sırasında iç deformasyon ve dönme nedeniyle düşme kinetik enerjisinin önemini göstermektedir. Yuvarlatılmış kenarlı bir orifisde damla ile orifis yüzeyi arasındaki teması önlemiştir diğer taraftan keskin kenara sahip bir orifisde ise çarpmanın ardından orifis yüzeyi teması teşvik etmiş ve yüzeye yakın akış alanı ve damlanın geçişindeki dinamikleri değiştirdiği belirtilmiştir. Keskin kenarlı ve hidrofobik yüzeye sahip orifis çalışmasında, temas noktaları orifis kenarlarına yakın bölgelerde kalır fakat kayma iğneleme ve damla yayılımını ve sonucunu güçlü bir şekilde etkilediği belirtilmiştir.

Diğer yandan, kesin kenarlı bir hidrofilik orifis için, temas çizgileri orifisin kenarlarından uzağa doğru yayılmakta ve bunların hareketi, damladaki ve çevresindeki sıvının küresel hız alanlarını birleştirmiştir. Minimum damla penetrasyonu ile hidrofilik bir orifis yüzeyi üzerindeki temas hattı yayılımını inceleyerek, değişken üslü kuvvet yasası bağımlılığı sergileyen damla yayılmasının iki aşamasını karakterize edilmiştir. İlk aşamada, temas hattı, darbe ataletinin ve yerçekiminin etkisi altında yayılmaktadır. İkinci aşamada atalet etkisi azalır ve temas hattı esas olarak ıslanabilirlik nedeniyle yayıldığı belirtilmiştir.

Hsiao ve ark. (2010) keskin kenarlı ve dik açılı orifis yüzeylerinde akış dinamiğinin incelenmesi ve sıcak tel tekniği ile duman akışının görselleştirilmesi yoluyla yapılan deneyse çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçları, Vena kontakt etkisinin orifis çıkışındaki geometrik yapıya ve Reynolds sayısına bağlı olduğu gösterilmiştir. Keskin kenarlı orifis düzlemindeki vena kontrakt etkisinin yüksek derecede önemli olduğu ve tutarlı yapıların gelişimini etkilemektedir. Keskin kenarlı orifis jetinde ilk kararsızlık frekansı  $Re = 10\ 300$  olarak bulunmuştur. Son olarak orifis düzlemi jetinde iki tür belirsizlik modu olduğu belirtilmiştir, bunlar varisli ve kıvrımlı modlardır. Kararsızlık modlarının Reynolds sayısının ve orifis çıkışının geometrik yapısına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Agrawal ve ark. (2005) aşındırıcı akışla işleme tekniğinin ve akışkan malzeme yapısının incelemesi üzerine yürütülen çalışmalarda macun içerisindeki metal aşındırıcı partiküllerin ve bu aşındırıcı metal partikülleri bir arada tutan macun yapının proses performansı parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiş ve tutucu macunun viskozitesinin bilinmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada visko-elastik ilkeleri göz önüne alınarak viskometre düzeneği oluşturulmuş ve denemeler yapılmıştır. Deneyler numune uzunluğu ve proses öncesi kütlesi lokal noktaların etkisi ile deneylerin tekrarlanabilirliği değerlendirmesi ile birlikte ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde dikkat edilen parametreler aşındırıcı macunun konsantrasyonu ve ulaştığı sıcaklık değerleridir. Elde edilen sonuçlarda bağlayıcı macunun viskozite değerlerinin içerisindeki aşındırıcıların konsantrasyonu ile arttığını,

karşılaşılan diğer sonuçta ise ortam sıcaklığı ile viskozite değerinin düştüğü belirtilmiştir.

Aşındırıcı akışla işleme (AFM) tekniği hem uygun akışkanlığa hem de işlenebilirliğe sahip özel ortamların gerekli olduğu durumlarda, mikro ve karmaşık yapıların işlenmesi için büyük potansiyele sahiptir (Zhang ve ark. (2022)). Yürütülen çalışmada, tipik bir ortam türünün bileşenleri, yapıları ve reolojik davranışları analiz edilmiş, ilk önce malzeme kaldırma mekanizması ele alınmıştır. Bağlayıcı macun yapısının reolojik davranışlarını analiz ederek kesme viskozitesi ve bağıl parametrelerin kesin olarak belirlendiği AFM sürecini simüle etmek için Carreau-Yasuda modeli uygulandığı belirtilmiştir. Duvar kayma davranışı, Genelleştirilmiş Navier kayma modeli tarafından analiz edilmiş ve tanımlanmıştır. Polimerin eridiği ve plastikleştirici olduğu gözlemlenmiştir. Polimer, bağlayıcı macunun akışkanlığına katkıda bulunan, birkaç yan grup içeren doğrusal zincirler içeren benzer bileşimler ve yapılar göstermektedir. Sürünme eğrisindeki yoğun pik değeri ( $3,55 Pa^{-1}$ ), viskoz bileşenin elastik bileşenden daha yüksek bir değer gösterdiğini gösterirken, sıçrayan regresyonun meydana gelmesi polimer zincirlerinin lineer yapısını daha da doğruladığı belirtilmiştir. Akış çizgilerinin daha büyük bölmelerden mikro yapılara geri çekilmesi ve kayma gerilimi ile ilk normal gerilim farkının birleşik etkileri nedeniyle, polimer zincirleri gerilmiş durumda kaldığı ve işlenmiş yüzeylerin tamamında tekdüze girinti derinliklerine ve makineyle işleme etkilerine yol açmıştır. Yeni simülasyon yöntemi ile elde edilen sonuçlarda, mikro deliklerdeki akış hızının, kabaca 1,5 m/s olduğu ve bu da tutma süresinin ( $2 \times 10^{-3}$ ), ortamın gevşeme süresinden (230 s) çok daha kısaydı, bu da uzun süredir devam eden gergin durumları gösteriyor. Homojen ve belirli bir derecede kesme gerilimi, iç delik yüzeyine yakın depolama ve kayıp modülleri, uygun ve düzgün işleme etkilerini büyük oranda doğrulamıştır. Bu araştırma, mikro yapılar için ortam tasarımına ve aşındırıcı akış işleme prosedürlerine, deneyler veya simülasyonlar açısından rehberlik etmesi açısından değerli olduğu sonucuna varılmıştır.

Aşındırıcı akışlı makineyle işleme (AFM) olarak bilinen geleneksel olmayan yeni bir bitirme işlemi, geniş bir uygulama yelpazesinde bileşenlerin çapaklarını almak, yarıçapı, cilalamak ve yeniden biçimlendirilmiş katmanlarını çıkarmak için kullanılır (Jain ve

Adsul (2000)). Dünya çapında yaklaşık 2000 makine kullanımında olmasına rağmen süreç nispeten yenidir. Bitirilecek yüzey boyunca yarı katı visko-elastik/visko-plastik aşındırıcı yüklü bir ortam akıtılarak malzeme iş parçasından çıkarılır. Geleneksel yöntemlerle erişilemeyen alanlar ve karmaşık pasajlar bu işlemle yüksek kalitede bitirilebilir. Süreç, havacılık, kalıplar ve kalıplar, otomotiv parçaları, tıbbi bileşenler vb. dahil olmak üzere çok çeşitli uygun uygulamaları kapsar.

Mevcut çalışmada, döngü sayısı, aşındırıcı konsantrasyonu, aşındırıcı ağ boyutu ve ortam akış hızı gibi farklı işlem parametrelerinin malzeme kaldırma ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulunan baskın işlem parametresi aşındırıcı konsantrasyonu, ardından aşındırıcı ağ boyutu, döngü sayısı ve ortam akış hızıdır. Malzeme olarak pirinç ve alüminyum ile deneyler yapılmıştır. Deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılır. İşlenmiş yüzey dokusu, taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

Loveless ve ark. (1994) araştırmalarında AFM'nin tornalama, frezeleme, taşlama ve tel elektrik deşarjlı işleme ile üretilen yüzeyler üzerindeki etkilerinin ve sonuçlarını incelemişlerdir. İncelenen makineyle işleme özellikleri arasında malzeme kaldırma ve yüzey kalitesi iyileştirme yer almaktadır. İstatistiksel analiz, makineyle işleme sürecinin türünün hem talaş kaldırma hem de yüzey kalitesi sonuçlarını etkilediği belirtmişlerdir. Ürün üzerindeki çalışmada ilk yüzey durumu, talaş kaldırma miktarını önemli ölçüde etkilediği ve yüzey kalitesi iyileştirmesi için istenen gereksinimini karşıladığı sonucuna varılmıştı. Özellikle tüm tel erozyon yüzeyleri AFM prosesi ile büyük ölçüde iyileştirilmiştir. Ortam viskozitesi, yalnızca yüzey gelişimini önemli ölçüde etkilerken, ekstrüzyon basıncının bu deneyde önemli bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir.

İş parçalarının yüzey özelliklerini incelemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Fotoğraflar, AFM'nin işleme süreçlerinin etkilerini yumuşatarak daha düzgün bir yüzey bıraktığı sonucuna ulaşılmış. AFM' den önce ve sonra yüzey pürüzlülük profillerini incelemek için stokastik bir modelleme ve analiz tekniği olan Veri Bağımlı Sistemler (DDS) kullanıldı. Genel olarak, taşlama ve aşındırıcı akışlı işleme arasında birçok benzerlik bulunmuştur. Bu çalışmada, AFM'nin çok yetenekli bir

bitirme işlemi olduğunu ve uygulama alanının genişletilmesi gerektiğini sonucuna varılmıştır.

Rhoades (1991) araştırmasında AFM prosesinin farklı ürünlerin işlenmesinde kısa sürelerde parça üzerindeki işleme yetenekleri üzerinde durmuştur. AFM prosesi yüzey işleme hassasiyeti ve yüzey pürüzlülüğü konusunda ileri seviye bir imalat prosesi olduğunu belirtmiştir.

Hassas parçaların imalatında kalan, ulaşılamayan bölgelerinin işlenmesi veya üretilmesi genellikle toplam imalat maliyetlerinin %15'ini oluşturan nihai son işleme operasyonlarını içerir. Kenarların ve yüzeylerin uygun şekilde işlenebilmesi, bir ürünün görsellik dışında daha önemli etkileri olduğunu belirtmiş bu bölgelerin işlenmesindeki etkiler; kontrollü, tutarlı kenar ve yüzey işleme, doğrudan işçilik maliyetlerini düşürürken ürün performansını ve ömrünü önemli ölçüde artırabilir. Bu işlemler, hassas bileşenlerin üretimini tamamen otomatikleştirmede kalan en büyük engel olarak tanımlanmıştır. Çapak alma, yuvarlatma, boyutlandırma ve cilalama için aşındırıcı akış işleme, etkileyici bir son işlem yelpazesine uygulanabilir ve tekdüze, tekrarlanabilir, öngörülebilir sonuçlar sağlar.

Singh ve ark. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada aşındırıcı akış ile işleme (AFM) işleminin geleneksel işleme yöntemleri ile kıyaslayarak üstünlükleri üzerine sistematik bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. AFM prosesinin farklı endüstriyelde kullanılan çeşitli imalatlarda yüzey ve pürüzlülüğü için gerekliliği ve üstünlüğü vurgulanmıştır. Çeşitli endüstriyel ürünlerin hassas noktalarının işlenmesi, geleneksel üretim metotlarında toplam sürenin ve ürün maliyetinin yaklaşık %40'ına eşit olduğu belirtilmiştir. AFM gibi konvansiyonel olmayan proseslerin temel amacı, istenen yüksek seviyedeki bitiş en düşük maliyetle elde etmek olduğu belirtilmiştir.

Walia ve ark. (2006), çalışmalarında bir iş parçasının yüzey kalitesini iyileştirmek için aşındırıcı macun üzerinde merkez kaç kuvveti ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmada iş parçası yüzeyindeki deliğe sokulan dönen ve merkez kaç kuvveti üreten (CFG) bir çubuk kullanılarak aşındırıcı macuna merkez kaç kuvveti uygulanmış, bu



işlemin performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada, CFG çubuğunun şekli ve dönme hızı, ekstrüzyon basıncı, işlem döngü sayısı ve aşındırıcı tane boyutu gibi parametrelerin değiştirilmesinin sonuçları irdelenmiştir. Sonuçlar, tüm girdi değişkenlerinin yanıt parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu çalışma için malzeme kaldırma ve yüzey pürüzlülüğü ön plana alınmıştır. Aşındırıcı parçacıkların işlem sırasında iş parçası yüzeyine sürtüdüğü hız ve açı için analitik bir model önerilmiştir.

Zhang ve ark. (2022) aşındırıcı ortamın mikro gözenekli yapılarda akış davranışını doğru bir şekilde analiz etmek için, Brid-Carreau modeli, Karışım modeli ve Ayrık Faz modeli ile birleştirilmiş HAD simülasyonu kullanmışlardır. Simüle edilmiş ve ölçülen hacimsel oranları karşılaştırarak, sonuçların geçerliliği doğrulandığı belirtilmiştir. Basınç, hız, duvar kayma gerilimi ve kayma hızı gibi akış parametrelerinin benzer dağılımı ve tüm mikro deliklerdeki olukların kabaca tekdüze dağılımı, işlenebilirliği ve aşındırıcı akışla işleme (AFM) mikro gözenekli yapıların tekdüzeliği, Akış çaplarındaki keskin daralmanın neden olduğu yüksek kesme hızına rağmen, 0,1 mm deliklerin işlenmesinden sonra ortamın bileşimi ve reolojisi zarar görmeyecektir. Ayrıca polimer bileşenlerinin yüksek sıcaklık hassasiyetinden dolayı termogravimetrik analiz (TGA) yapılmıştır. Plastikleştirici yağın polimer matrise olan 80.85 kayıp oranı ayrıca ortamın toplam ağırlık kaybında plastikleştirici yağın ana faktör olduğunu belirtilmiştir. Bir dizi sıcaklıkta (25 °C, 50 °C, 75 °C ve 100 °C) reoloji ile ilgili olarak, reolojik davranışların değerleri birbirinden farklı olduğu görülmüş ve bunun nedeni sıcaklıklar arasındaki dinamik varyasyondan kaynaklandığı belirtilmiştir. Sırasıyla güçlendirici etki ve plastikleştirici yağ kaybının ve sıcaklık artışının neden olduğu zayıflatıcı etki. Tüm reolojik davranışların benzer değişim eğilimi, sıcaklık 100°C'nin altında olduğunda ortamın reolojisinin zarar görmeyeceğini göstermiştir. Tüm sonuçlar, mikro gözenekli yapıları işlerken aşındırıcı ortamın mükemmel homojenliğini ve kararlılığını gösterdi ve AFM prosedürleri hakkında belirli bir kılavuz sağladığı görülmüştür.

Butola ve ark. (2018) yüzey bitirme işlemi için aşındırıcı akış işlemede (AFM) kullanılan parametrelerin (işlem döngülerinin sayısı, Ekstrüzyon basıncı ve Aşındırıcı konsantrasyonu) ve denenmiş varyasyonun çalışmasını ve Taguchi yöntemini

kullanarak optimizasyonunu üzerine çalışma yürütmüşlerdir. İş parçası, bu parametrelerin olası tüm düzenlemeleri 3 seviyede yapılarak denenmiş ve sonuçta toplam 27 iş parçası deneysel olarak işleminden geçirilmiştir. Parametrelerin optimum değerini bulmak için sonuçlar Taguchi yöntemi kullanılarak doğrulanmıştır. Deney yoluyla optimum sonucun 'Döngü sayısı 6'ya eşit olduğunda, ekstrüzyon basıncı 15 bar ve Aşındırıcı konsantrasyonu 100gm' olup, bu da işleme sonrası yüzey pürüzlülüğündeki yüzde farkının %26,42 olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuç, Taguchi tasarımlarının değişkenliğe neden olan tüm faktörlerin kontrol edilemeyeceğini kabul ettiğini göstermektedir. Bu kontrol edilemeyen faktörlere gürültü faktörleri denir. Taguchi tasarımları, gürültü faktörlerinin etkilerini en aza indirebilecek kontrol edilebilir faktörleri belirlemeye çalıştığı belirtilmiştir.

Wei ve ark. (2019) AFM prosesinde parça yüzeyinden malzeme kaldırmak için tek aşındırıcı malzeme kaldırma modelinin kombinasyonuna ve aktif aşındırıcıların istatistik modeline dayanan yeni bir deneysel modeli üzerinde çalışmışlardır. Uygulanabilirliğini doğrulamak aşamasında, malzeme işleme modelini kalibre etmek için iki deney yapılmış ve kalibre edilmiştir. Sonuçlar, bu modelin profil yüksekliği değişimi açısından malzeme kaldırmayı tahmin edebildiğini göstermektedir. Doğrulama deneylerinde elde edilen %6,4 ve % 6,9'luk öngörü hatası ( $\delta$  hatası) ile H ve kütle varyasyonu  $\Delta M$ 'nin varyasyon eğilimi, iş parçası ve akış kanalının verilmesi durumunda ise iş parçası yüzeyindeki profil yüksekliği  $\Delta H$  değişimi, iş parçası yüzeyindeki basınç ve ortam akış hızının dağılımı ile tutarlı bir dağılım eğilimi göstermektedir.

Saha ve ark. (2009) Entegre sütunlara sahip mikroakışkan kanallara Uygulanan Sıvı Hacmi (Volume Of Fluid-VOF) yöntemini kullanarak dinamik temas açısının üç boyutlu sayısal ve deneysel çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Başlangıçta, analitik formülasyon kullanarak iki boyutlu bir mikro kanalın kapiler dolumu için farklı dinamik temas açısı modellerini (hidrodinamik, moleküler kinetik ve ampirik) değerlendirmişlerdir. Ayrıca, ayarlanabilir parametrelerin minimum reçetesini gerektiren modeller, yalnızca DI su, etanol ve izopropil alkol gibi farklı çalışma sıvıları kullanan entegre sütunlara sahip mikro kanalların kılcal dolgu çalışması için kullanılır. Dairesel sütunlar için değişen çap / yükseklik / aralık ile farklı mikro kanal geometrisi

incelenmiştir. Kare sütunların etkisi ve toplam sütun sayısının kılcal fenomen üzerindeki değişimi de simüle edildi. Çalışmamız, dinamik temas açısı modellerinin menisküs yer değiştirmesinin geçici tepkisini değiştirdiğini ve ayrıca gözlemlenen eğilimlerin çeşitli mikro kanal geometrileri ve çalışma sınırları için modele özgü olduğunu gösterdi. Ancak farklı modellerin menisküs profili üzerinde minimal etkisi vardır. Sayısal çalışma için seçilen ızgara çözünürlüğünün dolmuş süresi üzerindeki etkisini gözlemlemek için farklı giriş sınır koşulları uygulandı. Sayısal sonuçların ızgara yakınsamasını gözlemlemek için, modelde etkin kaymayı içeren bir ızgara bağımlı dinamik temas açısı modeli de kullanılmıştır. Izgara bağımsızlığının, ızgaraya bağlı dinamik temas açısı modeli uygulanarak marjinal olarak iyileştirildiği gösterildi. Ayrıca, alternatif hidrofilik-hidrofobik desenlerle mikro kanalın üst ve alt duvarlarındaki değişken yüzey ıslama birliğini göz önünde bulundurarak sayısal kılcal dolgu deneyleri yaptık. Menisküs ön ıgneleme, desenler arasında yüksek bir ıslatma kontrastı için fark edildi. Düzgün olmayan akış çizgisi desenleri, desenli duvarlar kullanılırken sıvının karıştığını gösteriyordu. Entegre sütunlara sahip değişken yüzey özelliklerine sahip bu tür bir mikroakışkan cihaz, genellikle sınırların etkili bir şekilde ayrılmasını ve karıştırılmasını gerektiren biyolojik operasyonların gerçekleştirilmesi için yararlı olabilir.

## **2.2. Tezin Önemi ve Özgün değeri**

Günümüz imalat teknolojisi sektörde duyulan ihtiyaçlara göre şekillenmektedir. Her yeni ürün, yeni teknoloji veya üretim sistemi, yeni imalat metotlarının doğmasına veya var olan imalat metotlarının gelişmesini zorunlu kılmıştır. Bu tez çalışmasının konusu olan ‘imalat prosesi kaynaklı boru içi tıkanıklığının giderilmesine yönelik hava jeti uygulamasının nümerik incelenmesi’ yeni imalat metotlarından doğan imalat etkilerini gidermek üzerine başlatılmıştır.

Aşındırıcı akış ile şekillendirme işlemleri (AFM) yıllardır kullanılan bir metot olmasına rağmen birçok farklı dalda ve alanda kullanımı ve geliştirilmesi devam eden bir imalat metodudur. Son yıllarda enjektör gövdelerinde bulunan mazot delikleri gibi 1-2 mm aralığındaki delikleri işlemede kullanılmakta ve iyi performans göstermektedir.

Kullanıldığı alan göz önüne alındığında yeni teknoloji olarak nitelendirilmektedir. Belirtilen AFM metodunun negatif etkilerinden bir tanesi işlem sonrası delik veya işleme yüzeylerinden kalan bağlayıcı veya aşındırıcı partikülleridir. Hali hazır kullanılan teknolojide daldırma yöntemi veya hava tabancası ile bu kalıntıların uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Belirtilen yöntemler istenilen temizlik kriterlerini tam oranda sağlayamamaktadır. Yapılan tez çalışmasında bu işlem sonrası özel bir temizleme yöntemi kullanılması ön görülmüş ve çalışmalar bu yönde ilerlemiştir. Üç aşamalı olarak planlanan temizleme metodunun son aşaması olan hava jeti ile temizleme yapılan tez çalışmasını içermektedir. Yapılan tez çalışmasından oluşan tasarım ve sayısal veriler ışığında oluşturulan temizleme makinesinde kullanılacaktır. Gerçekleştirilen tez çalışması Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Bursa Uludağ Üniversitesi ile birlikte TÜBİTAK-1505 üniversite ve sanayi iş birliği kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılmış ve elde edilen veriler ile bir adet temizleme makinesi imalatı gerçekleştirilmiştir.

Tezin önemi; dizel enjektörlerdeki mazot deliklerinin verimliliği ve benzer imalat parçalarının temizlik kriterlerinin geliştirilmesinde önemli veriler sağlamasıdır. Dizel enjektörlerin imalat sonrası mazot yakıt deliklerinde kalan talaş partiküllerinin temizlenmesi ve bu temizleme prosesinin standart hale getirilmesi amacıyla araştırmalar yapılmış, sıvı ve hava ile temizleme işlemlerinin bu temizlik kriterlerindeki rolü araştırılmıştır. Çalışmalarda temizlenecek deliğe özel lüle/ventüri tasarımları oluşturulmuştur. Yapılan tasarımlarda farklı kriterler göz önünde bulundurulmuş olup bu kriterler lüle çapı, sıvı debisi ve hava debisi olmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmada belirtilen hipotezlere cevaplar aranmıştır;

- Temizleme prosesi sonrasında delik içerisindeki AFM macunu tamamen temizlenebilecek mi?
- Solvent uygulaması ile en kısa sürede uygulaması proses tamamlanacak mı?
- Kullanılacak lüle/ventüri için yeni bir yapısal tasarım gerekli midir?
- Kullanılacak temizleme metodu tek başına yeterli olacak mıdır?
- Delik geometrisinin kullanılacak debiye etkisi nedir?
- Kullanılacak farklı tipteki solvent/çözeltilerin sonuca etkisi var mıdır?

-Solvent uygulaması ardından hava uygulaması delik içerisindeki tüm solventi uzaklaştırabilecek midir?

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada boru içi tıkanıklığın giderilmesine yönelik hava jeti uygulamaları üzerine dünyadaki ve ülkemizdeki yapılan çalışmalar ve değerlendirme kriterleri araştırılmıştır. Yapılan literatür çalışmalarına dayanarak delik içerisindeki hem sıvı hem de havanın hareket edebileceği nozullarının CAD programlarıyla yapısal tasarımları gerçekleştirilmiş ve modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan nozullar üzerinde incelenen parametreler; nozul deliğinin çıkış çapı ve delik uzunluğudur. Diğer parametreler kullanılan solvent/çözücü özellikleri ve uygulanacak debidir. Her bir model üzerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde ANSYS Fluent programı kullanılarak, çift fazlı akış denklemleri ile kütle değişikliği eşitlikleri çözdürülmüştür. Farklı türbülans modellerinin akış üzerindeki etkileri araştırılarak uygun bulunan model üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz aşaması iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada solvent/çözücü ile HAD analizleridir analiz sonunda yeterli süre tespit edilip delik içerisindeki tamamen solvent/çözücü ile dolu olarak bırakılmış ve ikinci aşamaya geçilmiştir. İkinci aşamada içi solvent/çözücü dolu yakıt deliğine hava uygulanmış ve deliğin tamamen boşaltıldığı süre bulunmuştur. İki analiz aşaması incelenerek optimal parametreler belirlenmiştir.

#### 3.1. Dizel Enjektör Yapısı ve Mazot Deliği Geometrisi

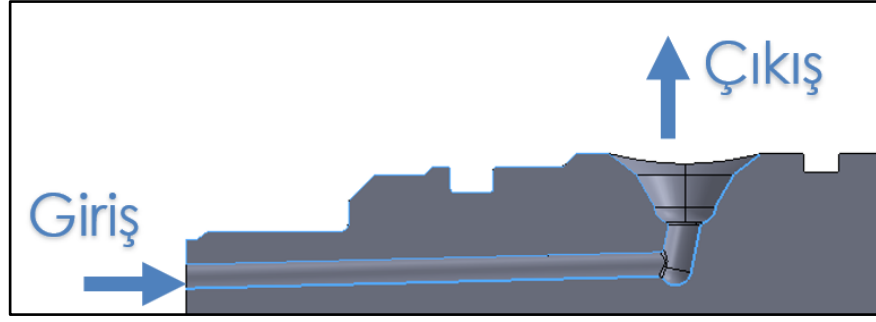
Dizel motorları yakıt donanımında bulunan enjektörler temel olarak bir gövde ve içerisinde hareket eden bir iğneden oluşmaktadır. Püskürtme pompası tarafından pompalanan yakıt, enjektör inisinin altındaki odacıkta yakıt basıncının artmasına neden olarak inenin yukarıya doğru hareketini sağlamak ve açılan enjektör deliğinden yakıt silindir içerisine püskürtülmektedir (Erdöl 2007). Dizel yakıtlı araçlarda motor içerisindeki ateşleme görevini gören dizel enjektörler birden çok parçadan oluşmaktadır. Araştırmaya konu olan bölümü ise diğer parçaları üzerinde taşıyan enjektör gövdesidir. Enjektör gövdeleri genel itibarıyla silindirik yapıya sahip olup geleneksel talaş kaldırma yöntemleri (CNC tornalama, frezeleme ve delik delme) ile imal edilmektedirler. Gövde üzerinde bileşenleri bağlamak amacıyla çıkıntılar ve pim delikleri bulunmaktadır (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1.** Dizel enjektör gövdesi

Çalışma kapsamında enjektör gövdesi üzerinde incelenen kısım temizleme işlemi yapılacak olan yakıt deliğidir. Delik gövde üzerinde iki ayrı noktadan açılan deliğin gövde içerisinde birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Silindirik gövde üzerine açılan kısa delik ile gövdenin alın yüzeyinden açılan uzun deliğin kısa deliğin yan yüzeyinde birleştirilmesiyle oluşmaktadır.

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere iki deliğin birleştiği kesişme noktalarının radyuslu bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Geleneksel talaş kaldırma (delik delme) metotları ile bu yapının verilmesi zordur. Bu yapısının oluşabilmesi için geleneksel olmayan AFM işlemi kullanılmaktadır. Bahsi geçen deliğin tıkanması veya talaşlı işlem sonrası metal partikül bulundurması enjektörün diğer parçalarını tıkayabilmekte, ateşleme problemlerine neden olabilmekte ve araç performansında istenmeyen düşüklüklere neden olabilmektedir. Bu nedenlerle temizlenecek delik geometrisi incelenmesi ve tasarlanacak nozulların geometri çap ve oranlarına uygun olması önem arz etmektedir.



Şekil 3.2. Dizel enjektör yakıt deliği kesit görünüşü

### 3.2. Aşındırıcı Akış ile İşleme (Abrasive Flow Machining – AFM)

Aşındırıcı akışla işleme (AFM), geleneksel olmayan bir işlemdir. AFM işlemi çapak alma, yarıçap, cilalama ve yeniden biçimlendirme katmanlarını çıkarma gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Aşındırıcı akışla işlemede metal talaş kaldırma, aşındırıcılarla karıştırılmış macunun işlenecek yüzey boyunca akıtılmasıyla gerçekleşir. Macun (medya), akış yolu boyunca seçilen alanları hassas bir şekilde aşındırma kabiliyetinden dolayı süreçteki kilit unsurdur (Agrawal ve ark. 2005).

Aşındırıcı akışla işleme dizel enjektör gibi 2 mm daha küçük deliklerde delik yüzeyine ve köşelere istenilen formu kazandırması açısından yüksek verimli ve ileri seviye bir işleme tekniği olmasının yanında kendi içerisinde negatif taraflarında bulunmaktadır. Newtonsal olmayan akış (non-newtonian fluid) özelliği gösteren AFM macunu yapısı gereği aşındırıcı talaş parçacıkları ve bu parçacıkları bir arada tutan macun yapısından oluşmaktadır (Şekil 3.3). Macunun reolojik özelliği delik benzeri yapılarda özellikle de delik geometrilerine bağlı olarak delik içerisinde kalabilmekte veya delik yüzeylerinde aşındırıcı talaş parçacıkları bırakabilmektedir. Belirtilen talaş parçacıkları çalışmaya konu olan sıvı ve ardından hava uygulaması ile temizlenememektedir. Belirtilen temizlik için farklı solvent/çözücülerin farklı debilerde delik içerisindeki akış karakteri incelenecektir.



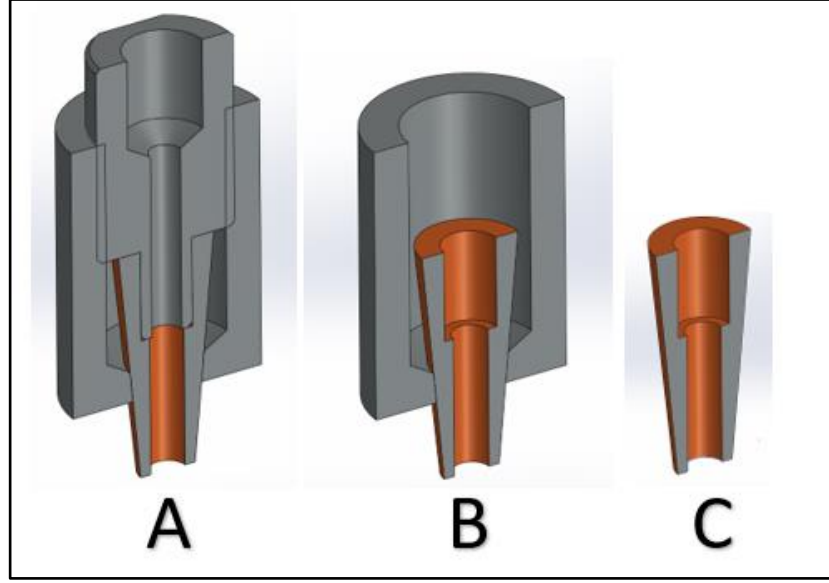


**Şekil 3.3.** AFM macunu

### **3.3. Nozul Yapıları ve Nozul Tasarımı**

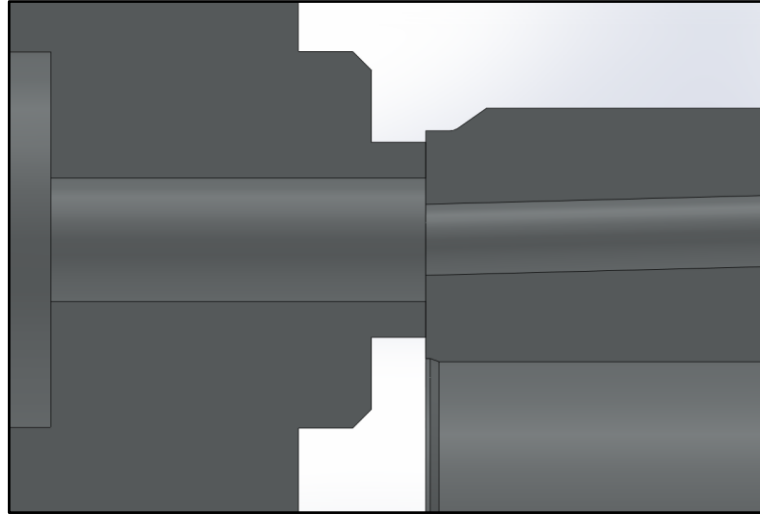
Hava jeti veya hava nozulları noktasal bölgelere basınçlı hava üflemede kullanılan, tek parça veya birkaç parçadan oluşan endüstriyel ürünlerdir. Güçlü hava üfleme gereksinim duyulan noktalarda kullanılırlar. Kullanıldığı alan göz önüne alınarak dış ve iç geometrik yapıları sayesinde basınçlı hava aktarımında güç tasarrufu sağlayabilirler. Çalışma alanlarına göre tasarlanabildiklerinden uygulama alanları oldukça geniştir.

Enjektör mazot giriş deliğine uygun pozisyonlanabilecek 3 boyutlu bir tasarım oluşturulmuştur (Şekil 3.4). Tasarım üç adet parçadan oluşmaktadır. Nozul tasarımı enjektör gövdesinin yüzeyini aşındırmaması amacıyla esneyebilen malzemedен seçilmiştir. Analizde kullanılan nozul bölümü üç ayrı çapa sahip (4 mm, 4,4 mm ve 4,8 mm) ve 15 mm uzunluğundadır. Nozul enjektör mazot giriş deliğine temas eden bölümdür.



**Şekil 3.4.** Nozul sistemi bileşenleri. A) Nozul montajı B) Nozul bağlantı aparatı C) Esnek nozul tasarımı

Mazot çıkış deliğinden akışkanın serbestçe çıkabilmesi için çıkış bölümündeki nozul  $\text{Ø}1,90 \text{ mm}$ ' den geniş bir çapta tasarlanmıştır. İki delik aynı eksende birleşerek sızdırmazlık sağlanması amaçlanmıştır. (Şekil 3.5)

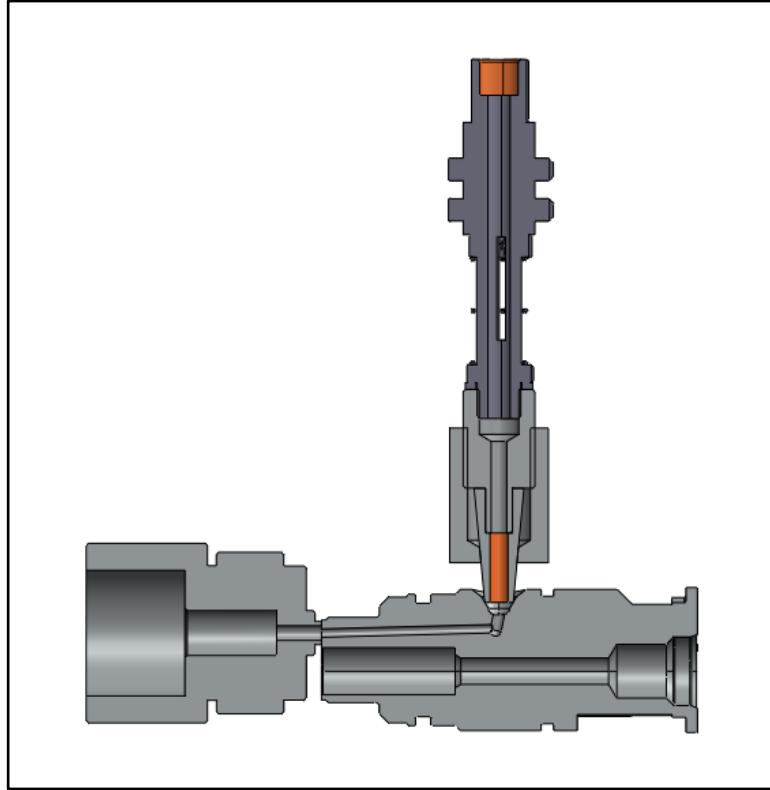


**Şekil 3.5.** Mazot çıkış deliği nozul tasarımı

### 3.4. Enjektör Gövdesi Yakıt Deliği Temizleme Prosesi Tasarımı ve Montajı

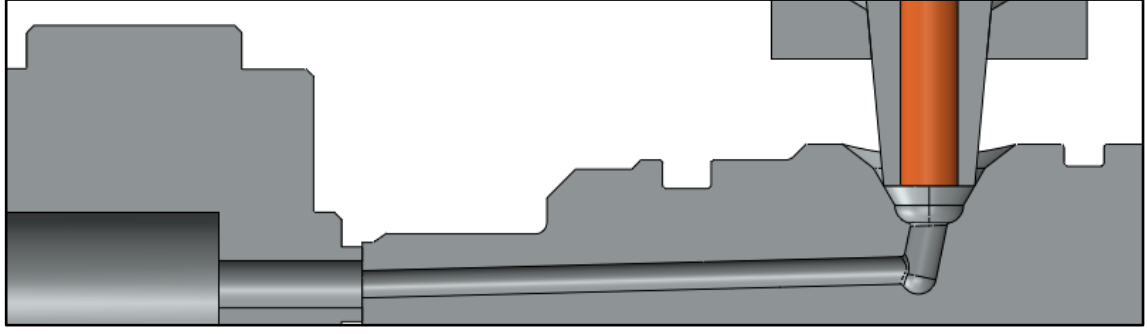
Yakıt deliği temizleme prosesinin belirlenmesinde temel faktör yakıt deliğinin boyutları ve gövde üzerindeki giriş ve çıkış konumları olmuştur. Enjektör gövdesi silindirik bir yapıya sahip olup enjektör alnından  $\text{Ø}1,90$  mm delik ve gövde üzerinde  $\text{Ø} 2,5$  mm deliğinin gövde içerisinde birleşmesinden oluşmaktadır.

Tasarlanan sistem solvent/çözücü ve havayı enjektör gövdesinde bulunan delikten basarak enjektör aln yüzeyinde bulunan delikten çıkmasını sağlayacak şekildedir (Şekil 3.6).



**Şekil 3.6.** Yakıt deliği temizleme tasarımı

Akışkanın basılacağı bölümde sızdırmaz yaylı bir aparat kullanılmış ve tasarlanan nozul bu sistem ucuna dişli olarak monte edilmiştir. Oluşturulan sistem farklı basınçlarda delik içerisine nozulu bastırarak sızdırma olmaksızın tüm akışkanı delik içerisine gönderebilmektedir. çıkış çapındaki nozul ise enjektör çıkış deliği çapından büyük olacak şekilde ölçülemiştir (Şekil 3.7).

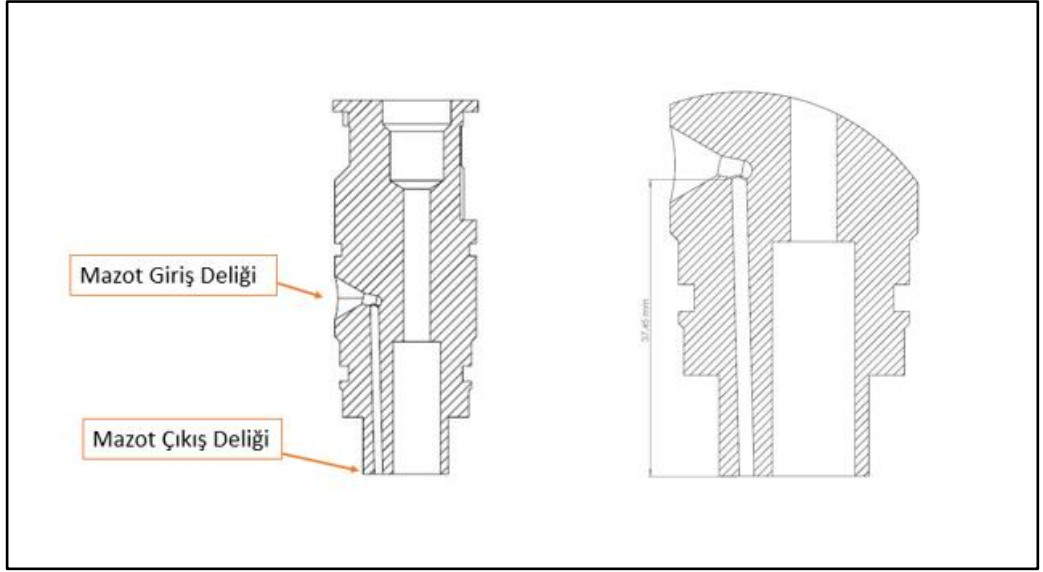


**Şekil 3.7.** Yakıt deliği temizleme tasarımı

### **3.5. Enjektör Gövdesi Yakıt Deliği Akış Hacminin Oluşturulması**

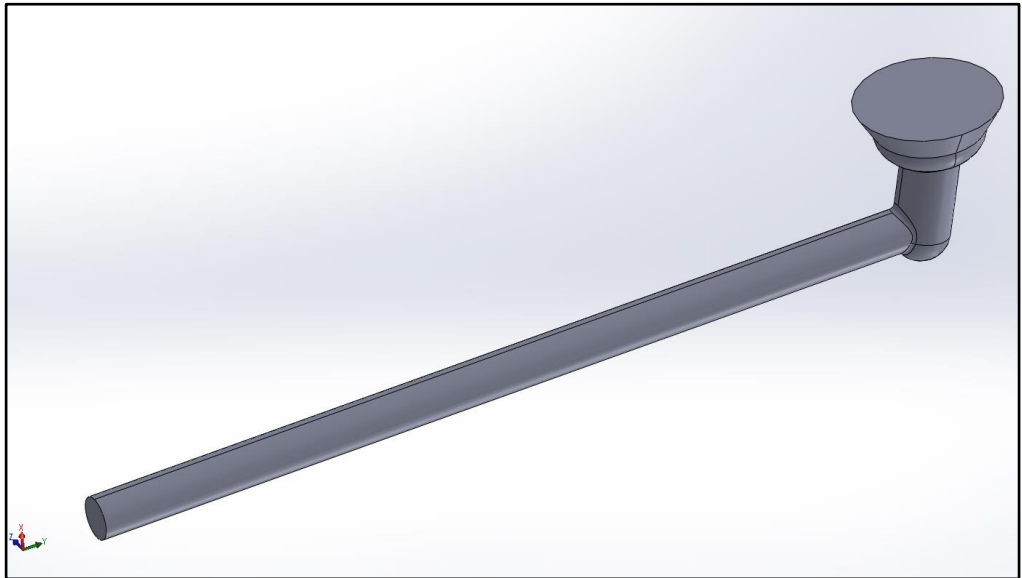
Temizleme işlemi uygulanacak dizel enjektör yakıt deliği için uygun temizleme tasarımı oluşturulmuş ardından dizel yakıt deliğinin akış hacminin CAD programında 3 boyutlu modelinin oluşturulmasına geçilmiştir. Enjektör yakıt deliğinin 2 boyutlu yapısı şekil 3.5’ de görülmektedir. Dizel enjektör gövdelerinde yakıt delikleri gövdenin iki ayrı noktasından açılır ve bu iki deliğin gövde içerisinde birleşimi ile oluşmaktadır. İki deliğin gövde içerisindeki kesişim bölgeleri keskin köşeli ve çapaklı olmaktadır. Gövde içerisinde bulunan kesişim bölgelerinin Aşındırıcı Yüzey İşleme ile azaltılarak radyuslu bir forma kavuşturulur.

Mazot giriş deliği olarak gösterilen delik ölçüleri  $\text{Ø}2,5$  mm ve 2,90 mm uzunluğundadır. Mazot çıkış deliği olarak isimlendirilen delik ise  $\text{Ø}1,90$  mm ve 37,00 mm uzunluğa sahiptir (Şekil 3.8).



**Şekil 3.8.** Dizel enjektör yakıt deliği 2D yapısı

Solidworks programında enjektör gövdesi üzerinden dolgu yüzeyi komutu ile delik yüzeyinin sınır tabakaları seçilmiş ardından dikili yüzey komutu yardımıyla delik geometrisinin üç boyutlu kalıbı çıkarılmıştır. Solidworks programında 3 boyutlu modeli oluşturulan dizel enjektör deliğinin katı modeli Şekil 3.9’da görülmektedir.



**Şekil 3.9.** Dizel enjektör deliği akış hacmi

### 3.6. Solvent/Çözücü Parametreleri ve Akış Hızının Belirlenmesi

Oluşturulan tasarım sonrası yakıt deliği içerisinden geçecek solvent/çözücü parametreleri belirlenmiştir. Seçilen solvent/çözeltiler endüstride yaygın kullanılan kimyasallardan olmasına dikkat edilmiştir. Solvent/çözümler Parametre belirlemede kimyasalların yoğunluk ve viskozite özellikleri baz alınmıştır. Belirlenen özellikler tablosu Çizelge 3.1’de paylaşılmıştır.

**Çizelge 3.1.** Delik içi yüzeyi temizlemek amacıyla seçilen kimyasal solvent/Çözücü Tablosu

| No | Solvent Tipi | Yoğunluk ( $\rho$ ), kg/m <sup>3</sup> | Viskozite ( $\mu$ ), mPa.s |
|----|--------------|--|----------------------------|
| 1  | Solvent 1    | 780                                    | 0,85                       |
| 2  | Solvent 2    | 805                                    | 1,20                       |
| 3  | Solvent 3    | 950                                    | 3,25                       |

Delik içerisinden geçirilecek solventin bir diğer girdi parametresi hacimsel debidir. Tezin konusunu oluşturan TÜBİTAK-1505 projesi kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda delik içerisindeki yüzey temizliğinin 1,8 l/dk debide basılan solvent ile sağlandığı görülmüştür. Bu noktadan yola çıkarak debiyi yarıya düşürerek aynı temizlik oranının görülüp görülemeyeceği de belirlenecektir. Bu nedenle giriş debileri 0,5 kat sayısı ile çarpılarak 1,5 l/dk, 0,75 l/dk ve 0,375 l/dk oranında belirlenmiştir. HAD analizlerinde debiler girişi hız olarak verildiğinden her debiyi giriş hızı değerine çevrilmiştir. Çevrim denklemi (3.1)’de olduğu gibidir.

$$Q = V \cdot A \quad (3.1)$$

$$A = \frac{\pi \cdot D}{4} \quad (3.2)$$

Uygulamada kullanılan giriş deliğinin çapı 4 mm dir. Verilen denklemde yerine konulduğunda giriş hızları Çizelge 3.2’deki gibi bulunmuştur.

**Çizelge 3. 2.** Akışkan Giriş Hızı Tablosu

| No | Hacimsel Debi, l/dk | Giriş Çapı, m | Giriş Hızı, m/s |
|----|---------------------|---------------|-----------------|
| 1  | 1,5                 | 4             | 2               |
| 2  | 0,75                | 4             | 1               |
| 3  | 0,375               | 4             | 0,5             |

### 3.7. Enjektör Yakıt Deliği HAD Analizleri

Analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada enjektör deliği içerisindeki solvent/çözelti akışı incelenecek ikinci aşamada içerisinde solvent dolu olan delikten solventin uzaklaştırılması hava ile yapılan analizler incelenecektir. Her iki analiz çift fazlı akışkanlar olarak analize tabi tutulacaktır. Enjektör yakıt deliklerinin temizleme analizleri için yakıt deliği girişinde uzunlukları aynı ve farklı çaplara sahip lüleler kullanılmıştır. Çıkış deliğinde bulunan lüle çapı sabit tutulmuştur. Diğer girdiler ise solvent/çözücülerin termofiziksel özellikleri ve akışkanın giriş hızlarıdır. Analiz sonuçlarının en iyi şekilde gerçekleştirilebilmesi için Taguchi istatistiksel deney tasarımı yönteminden faydalanılmıştır. Böylelikle oluşturulan tasarımların akış karakteristiklerinin incelenmesine olanak sağlanmıştır. Çalışmalarda 3 parametre ve 3 seviyeli Taguchi  $L_9(3)^3$  deney tasarımında giriş sınır şartı akışkanın giriş hızı olarak belirlenmiş ve deney tasarımı Çizelge 3.3'de görüldüğü şekilde oluşturulmuştur.

**Çizelge 3.3.** Lüle tasarımını optimize edilmesi amacıyla oluşturulan Taguchi'nin L9(3)3 deney tasarımına ait seviye kombinasyonları

| No | Lüle Kenarı | Lüle Çapı, mm | Giriş Hızı, m/s |
|----|-------------|---------------|-----------------|
| 1  | Solvent1    | 4             | 2,00            |
| 2  | Solvent1    | 4,4           | 1,00            |
| 3  | Solvent1    | 4,8           | 0,50            |
| 4  | Solvent2    | 4             | 1,00            |
| 5  | Solvent2    | 4,4           | 0,05            |
| 6  | Solvent2    | 4,8           | 2,00            |
| 7  | Solvent3    | 4             | 0,05            |
| 8  | Solvent3    | 4,4           | 2,00            |
| 9  | Solvent3    | 4,8           | 1,00            |

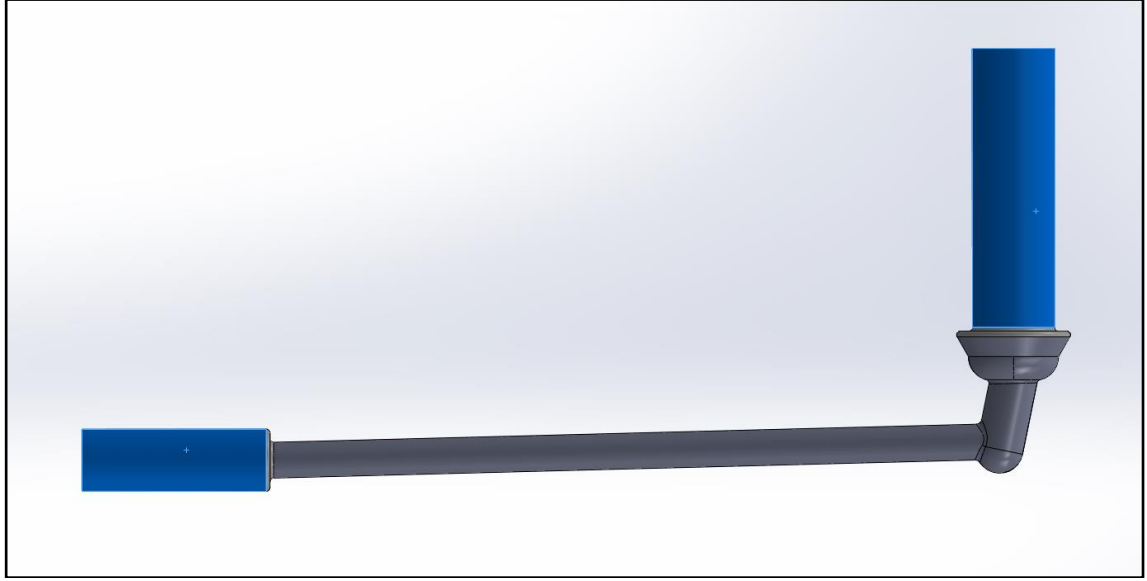
İkinci aşama analizleri için hız 5 m/s olarak sabit alınmış sadece giriş çapları değişecek şekilde 3 analiz gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3. 4.** İkinci aşama tasarım tablosu

| No | Lüle Çapı, mm | Giriş Hızı, m/s |
|----|---------------|-----------------|
| 1  | 4             | 5,00            |
| 2  | 4,4           | 5,00            |
| 3  | 4,8           | 5,00            |

Çizelge 3.3'teki verilen ışında SolidWorks yazılımında deney tasarımları oluşturulmuştur. Tasarımlarda enjektör gövdesi akış hacmi, üç adet lüle çapı ve bir adet çıkış lülesi olmak üzere 9 adet tasarım montajı yapılmıştır. Modellerin birleşim noktalarının kolay mesh ağı örülebilmesi amacıyla 0,2 mm radyus verilmiştir. Mesh analizlerinde kolaylık sağlaması amacıyla SolidWorks yazılımında her tasarıma birleştirme uygulanmış ve STEP dosya formatında kaydedilmiştir. Birleştirme amacı mesh oluşturmada modeli tek bir parça olarak tanınması ve mesh ağlarının yüzey boyunca düzenli olarak kurulmasını sağlamaktır. Oluşturulan 1 nolu akış hacmi modellerini Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



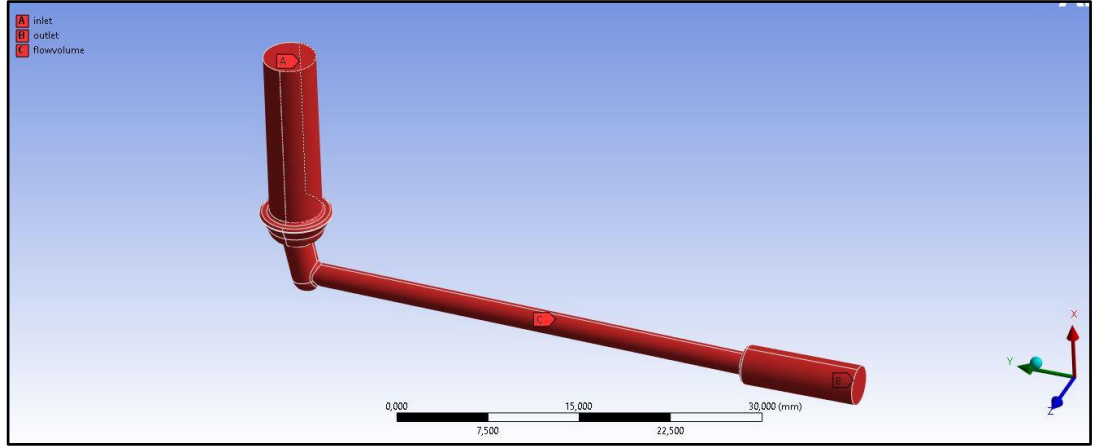


**Şekil 3.10.** Taguchi deney tasarımındaki 9 seviye kombinasyonuna ait 1' Nolu akış hacmi tasarımları

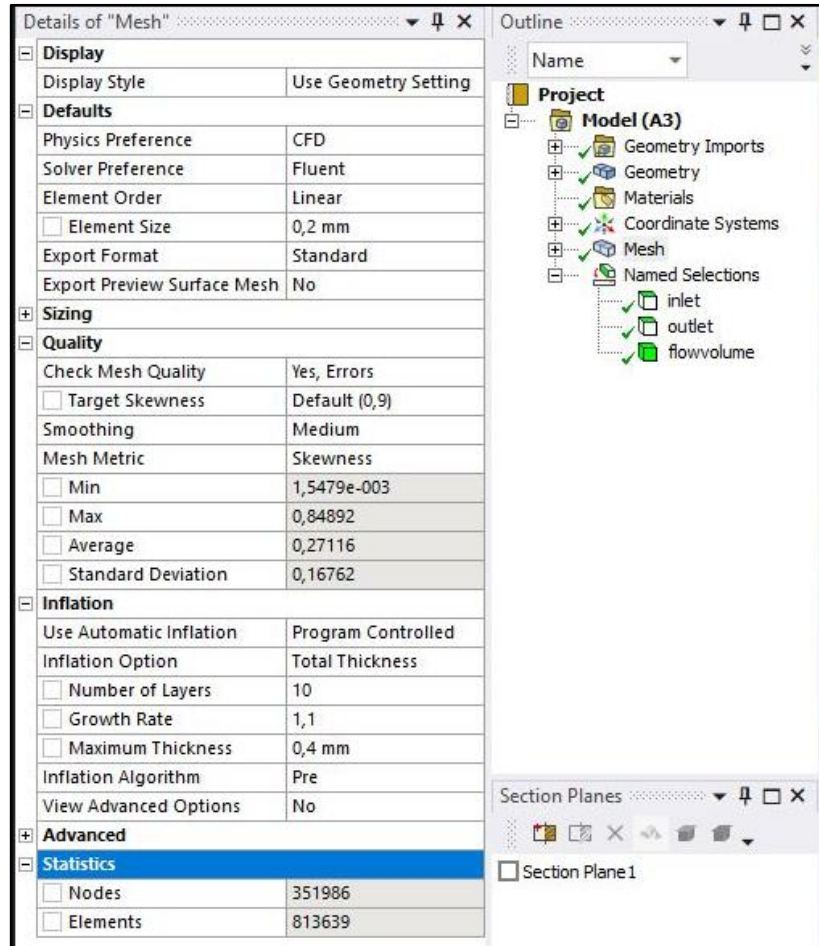
### 3.7.1. Enjektör Yakıt Deliği Ağ Yapısının Oluşturulması

Her bir model, aynı yakıt deliği geometrisine sahip olsa da lüle tasarımları birbirinden farklıdır. Dolayısıyla oluşturulacak ağ yapılarının aynı olması beklenmemektedir. Bununla birlikte, her bir modelde yakıt deliğinin benzer eleman yapısına ve ağ kalitesine sahip olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca lüleler için mümkün olduğu kadar benzer ağ parametreleri kullanılmış ve bu sayede ağ kaynaklı değişkenliklerin en aza indirilmesi suretiyle ihmal edilmesi mümkün hale gelmiştir.

Ağ oluşturma işleminde Ansys Meshing programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk adım olarak 1 nolu modelde uygulanmıştır. Modelin Akış analizi için inlet outlet ve akış hacmi isimlendirilmiştir (Şekil 3.10). Ağ yapısı oluşturmada eleman boyut 0,2 mm girişmiş olup, yakıt deliği sınır tabaka bölgesi ve akışın yön değiştirdiği bölgelere sınır tabaka yapısı (inflation) tanımlanmıştır (Şekil 3.11). Bu sayede sınır tabakada akışı literatüre uygun bir şekilde ele alınarak daha hassas çözüme ulaşılması hedeflenmiştir.



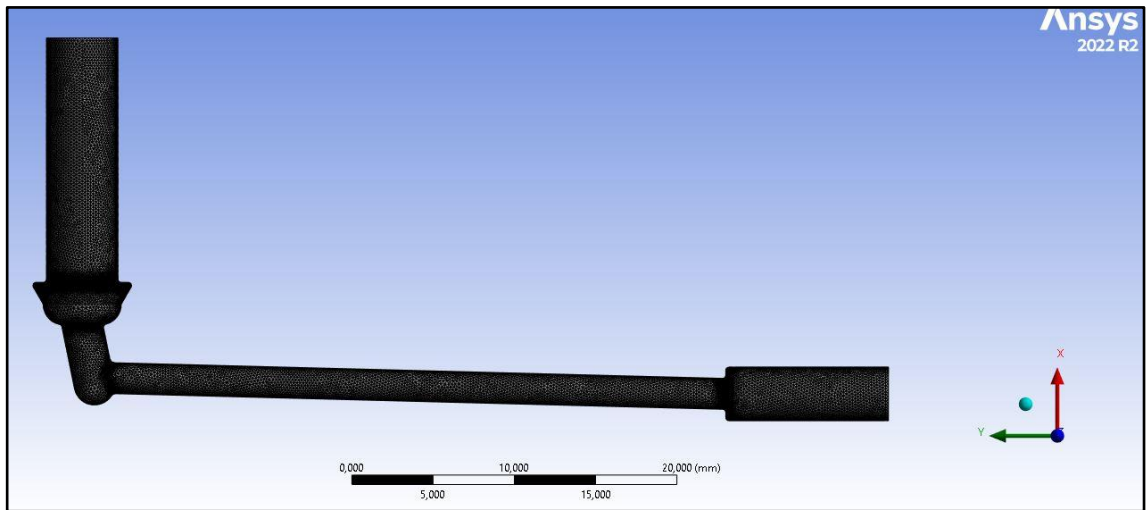
Şekil 3.11. Taguchi deney tasarımındaki 9 seviye kombinasyonuna ait 1' Nolu akış hacmi, inlet ve outlet bölgeleri



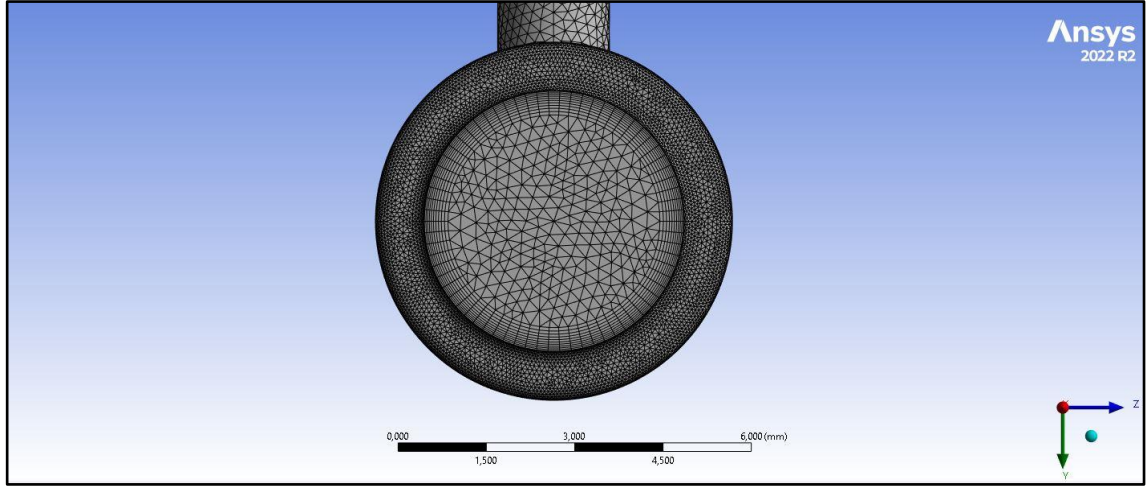
Şekil 3.12. Taguchi deney tasarımındaki 9 seviye kombinasyonuna ait 1 nolu tasarım ağ oluşturma parametreleri

Oluşturulan ağ yapılarındaki hücre kalitesini iki unsur belirlemektedir. Bunlar skewness (çarpıklık) ve ortogonal (orthogonal) kalitedir. Bu değerler sayısal çözümün doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler. Skewness (çarpıklık) değeri, hücrenin şekli ile eşdeğer hacimli eşkenar bir hücrenin şekli arasındaki fark olarak tanımlanabilir. Çok eğimli (çarpık) hücreler doğruluğu azaltabilir ve çözümü istikrarsızlaştırabilir. Örneğin, en uygun dörtgen gözenekler 90 dereceye yakın köşe açlarına sahipken, üçgen kafesler tercihen 60 dereceye yakın açılara sahip olmalı ve 90 dereceden daha az açılara sahip olmalıdır. Oluşturulan ağın ortalama skewness değeri 0,27 dir.

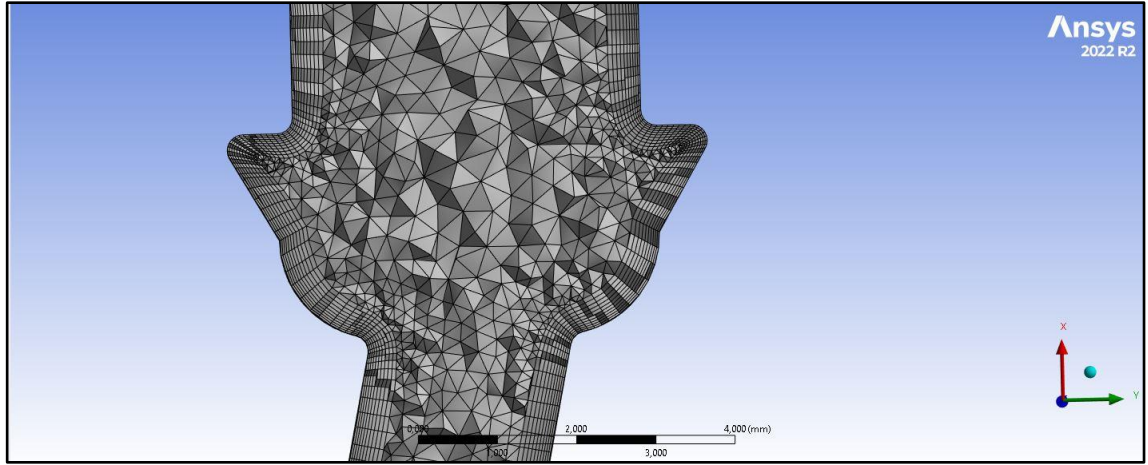
Ortogonal kalitesi ise ağ yapılarında hücre ağırlık merkezinden hücrenin her bir yüzüne olan vektörler, karşılık gelen yüzey alanı vektörü ve hücre ağırlık merkezinden bitişik hücrelerin her birinin ağırlık merkezinde olan vektörler kullanılarak hücreler için hesaplanır. En kötü hücreler 0'a yakın iken en iyi hücreler 1'e daha yakın bir ortogonal kaliteye sahip olmaktadır. Oluşturulan ağ yapısının ortogonal kalite değeri 0,72 olmuştur.



**Şekil 3.13.** 1 nolu modele ait 3 boyutlu HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısı



**Şekil 3.14.** 1 nolu model girişe (inlet) ait 3 boyutlu HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısı



**Şekil 3.15.** 1 nolu model inflation ağ yapısı

Çalışma içerisinde analizler için oluşturulan 9 adet lüle için oluşturulan ağ yapıları içerisinde en düşük ortalama ortogonal kalite 0.73, en yüksek ortalama skewness (çarpıklık) değeri ise 0,26 olarak tespit edilmiştir. Değerlerin istenilen aralıklar içerisinde olduğu görülmüştür. Oluşturulan modellerin ağ yapıları tablosu Çizelge 3.5’ de paylaşılmıştır.

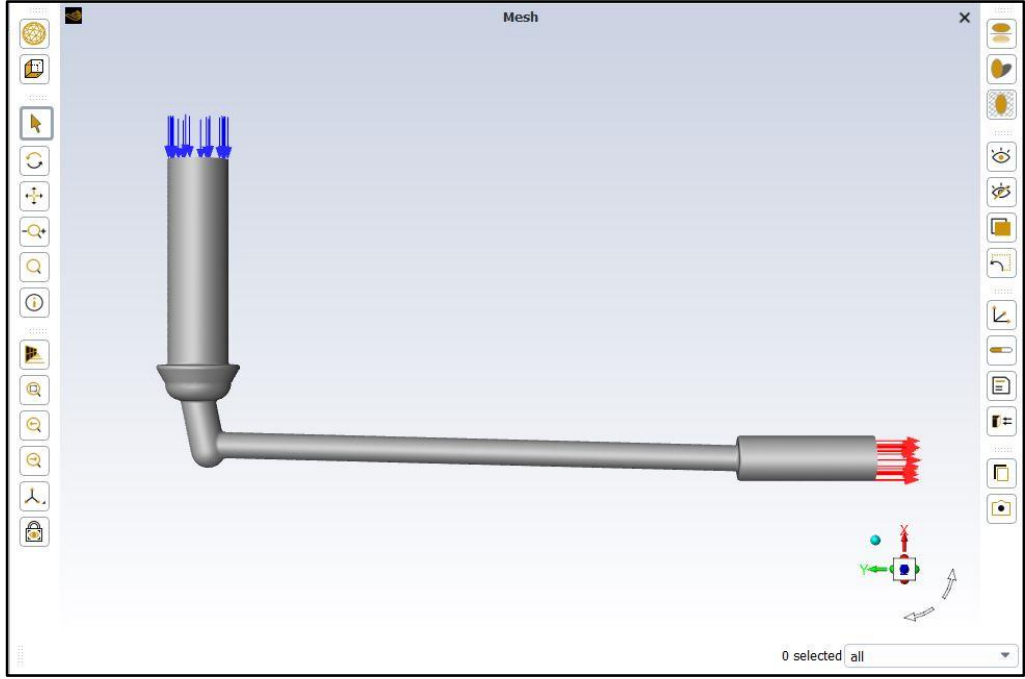
**Çizelge 3.5.** Ağ yapıları eleman sayıları, Skewness (Çarpıklık Değeri) ve Ortogonal Değer Tablosu

| No | Eleman sayısı | Düğüm Sayısı | Çarpıklık Değeri | Ortogonal Kalite |
|----|---------------|--------------|------------------|------------------|
| 1  | 813639        | 351986       | 0,27116          | 0,72830          |
| 2  | 813789        | 352183       | 0,26429          | 0,73511          |
| 3  | 824177        | 353729       | 0,26128          | 0,73812          |
| 4  | 813639        | 351986       | 0,27116          | 0,72830          |
| 5  | 813789        | 352183       | 0,26429          | 0,73511          |
| 6  | 824177        | 353729       | 0,26128          | 0,73812          |
| 7  | 813639        | 351986       | 0,27116          | 0,72830          |
| 8  | 813789        | 352183       | 0,26429          | 0,73511          |
| 9  | 824177        | 353729       | 0,26128          | 0,73812          |

### 3.7.2 ANSYS Fluent HAD Analizleri

ANSYS Fluent 2022 R2 programı ile yürütülen analiz çalışmalarında akışkanın giriş vektörü, giriş yüzeyine dik olarak tanımlanmış; giriş şartı da hız olarak seçilmiştir (Şekil 3.16). Analizlerde türbülanslı ve sıkıştırılabilir akış tercih edilerek standart k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmış, model olarak “Volume of Fluid” iki fazlı akış tayin edilmiştir.

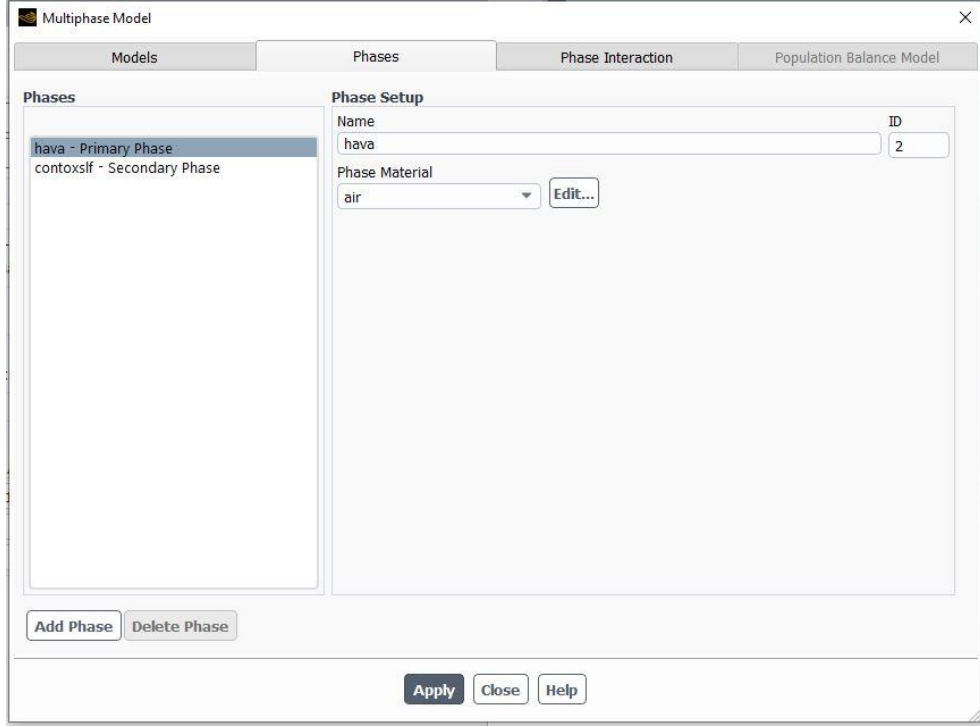
İki adımda gerçekleştirilen analizlerde ilk adım Taguchi'nin L9(3)<sup>3</sup> kombinasyonu ile oluşturulan 9 adet tasarım üzerinde olmuştur. Analizlerin zamana bağlı değişimini görmek için transient modu seçilmiştir. Model üzerinde tanımlanan giriş bölgesi (inlet) x vektörüne zıt olduğundan yer çekimi ivmesi -9,81 m/s<sup>2</sup> girilmiştir.



**Şekil 3.15.** 1 nolu model giriş ve çıkış vektörleri

Bir sonraki aşamada malzeme tanımı yapılmıştır. Çift fazlı yürütülen analizlerde birinci faz hava ikinci faz ise solvent/çözücü olarak seçilmiştir. Literatür araştırmalarına dayanarak ilk fazın akış hacmi içerisinde bulunduğu ikinci fazın ise akış hacmine giriş fazı olarak seçildiği belirlenmiştir (Şekil 3,16).

İki fazlı akış farklı özelliklerde iki komponentin karşılıklı etkileşimli hareketi olarak tanımlanabilir (Kleinstreuer 2003). Bu etkileşimler fazlar arası enerji, momentum ve kütle geçişi şeklinde olabilir ve fazların özellikleri ile ortam şartlarına göre farklı karakterler gösterebilirler. Buna bağlı olarak akışı tanımlama biçimi ve çözüm yaklaşımları da farklılık gösterir (Başyazıcı 2007). Malzeme seçiminde birinci faz havanın değerleri sabit tutulmuş olup ikinci faz da değerler Çizerge 3.1’de bulunan değerler girilmiştir. Çok fazlı model olarak “Volume of Fluid” yürütülen çalışmada her zaman artışının yakınsaması istendiğinden hacim oranı parametresi olarak “implicit” seçilmiştir. Yüzey gerilim katsayısı değeri 0,072 olarak girilmiştir. delik hacmi çok küçük olduğundan sıcaklık değişimi ihmal edilmiştir.



**Şekil 3.16.** HAD analizleri “Volume of Fluid” model faz seçimi

Gerçekleştirilen HAD analizlerinde akış tipinin belirlenebilmesi için Reynolds sayısına başvurulmuştur.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (3.3)$$

Çizelge 3.3’teki tabloya Reynolds denklemi (3.3) uygulanırsa model deki akışın türbülanslı akış olduğu belirlenecektir. Reynolds sayısı değer aralıkları 4404,7 ile 14682,4 arasındadır. Bu nedenle akış genel olarak türbülanslı olduğunda Şekil 3.17’de akış modeli tablosunda k-epsilon akış modeli seçilmiştir. K-epsilon modeli, türbülanslı akışlarda kinetik enerjiye etki eden mekanizmaları çözümler. İki denklemlilik bir türbülans modeli olan bu denklemde k türbülansın kinetik enerjisini ve epsilon kinetik enerjinin sönmeme oranı olarak ifade edilmektedir. Boru içi akış analizlerinde bu model seçilmektedir. Seçilen denklemin arka planında süreklilik, momentum ve türbülans denklemleri çözdürülmektedir.

Silindirik koordinatlar için Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

Burada;  $r, u, \theta, z$  ifadeleri sırasıyla yarıçap, giriş hızı,  $z$  eksenini ile çap arasındaki açı,  $z$  eksenini uzaklığı temsil etmektedir.

Silindirik koordinatlar için Navier-Stokes denklemleri:

$r$ -bileşeni:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$\theta$ -bileşeni:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$z$ -bileşeni:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Burada;  $r, \theta, z, P, g$  ifadeleri sırasıyla yarıçap,  $z$  eksenini ile çap arasındaki açı,  $z$  eksenini uzaklığı, basınç ve kütle kuvvetini temsil etmektedir.



Standart k-ε türbülans modeli denklemleri:

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

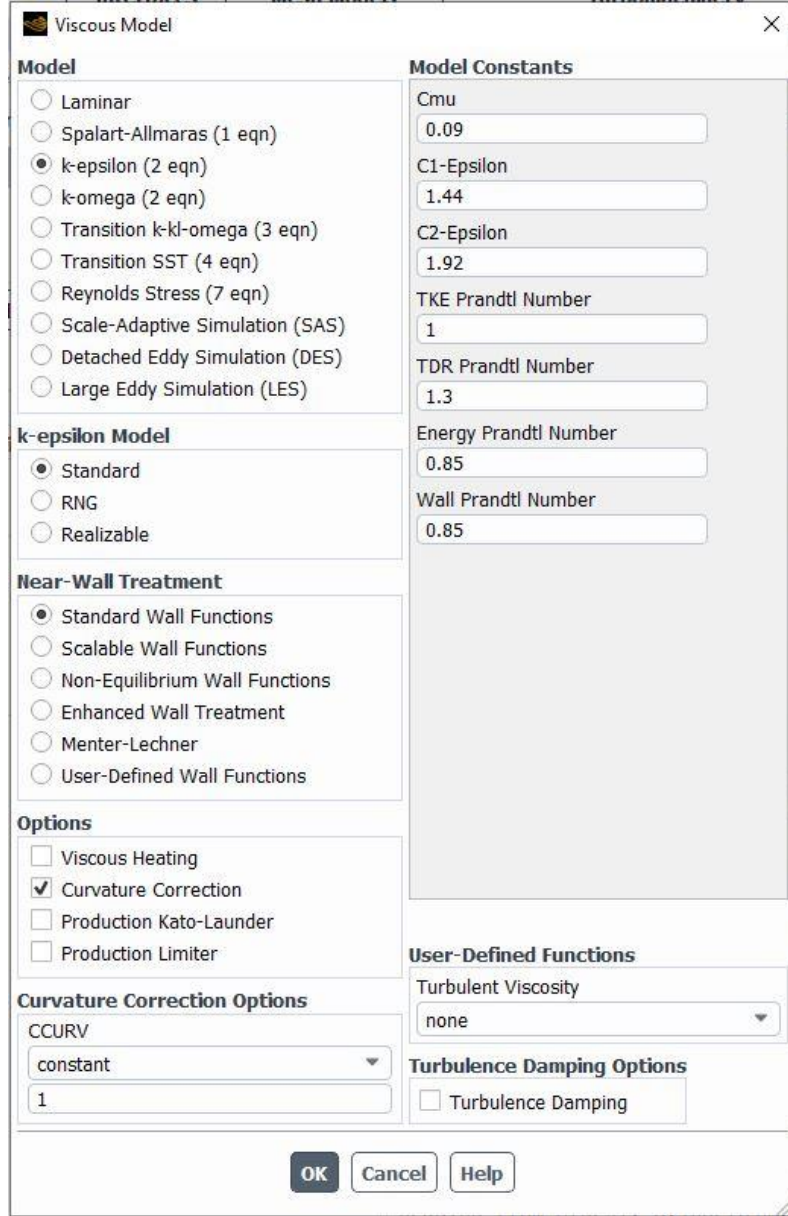
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon}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

Burada  $G_k$ , ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimini;  $G_b$ , kaldırmadan dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimini;  $Y_M$ , dalgalanan genişlemenin sıkıştırılabilir türbülansın genel dağılıma oranına katkısını;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$ , sabit katsayıları;  $\sigma_k$ , k için türbülans Prandtl numarasını;  $\sigma_\varepsilon$ , ε için türbülans Prandtl numarasını,  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  ise kaynak terimlerini ifade etmektedir.

Türbülans viskozitesi:

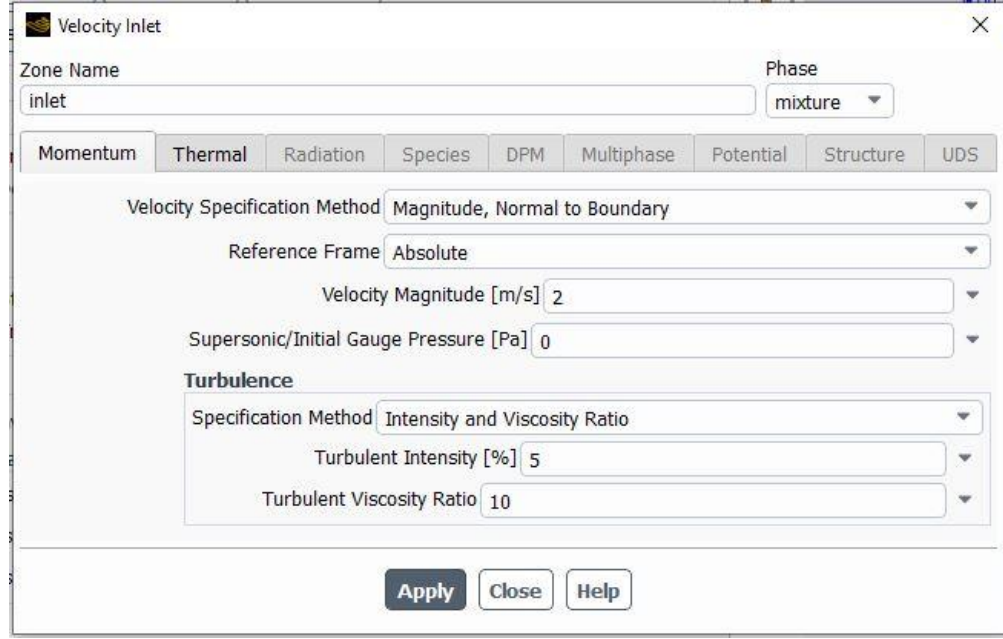
$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

Burada  $C_\mu$ ,  $k$ ,  $\varepsilon$  ifadeleri sırasıyla sabit katsayıyı, türbülans kinetik enerjisini ( $m^2/s^2$ ) ve yayılma hızını ( $m^2/s^3$ ) temsil etmektedir.



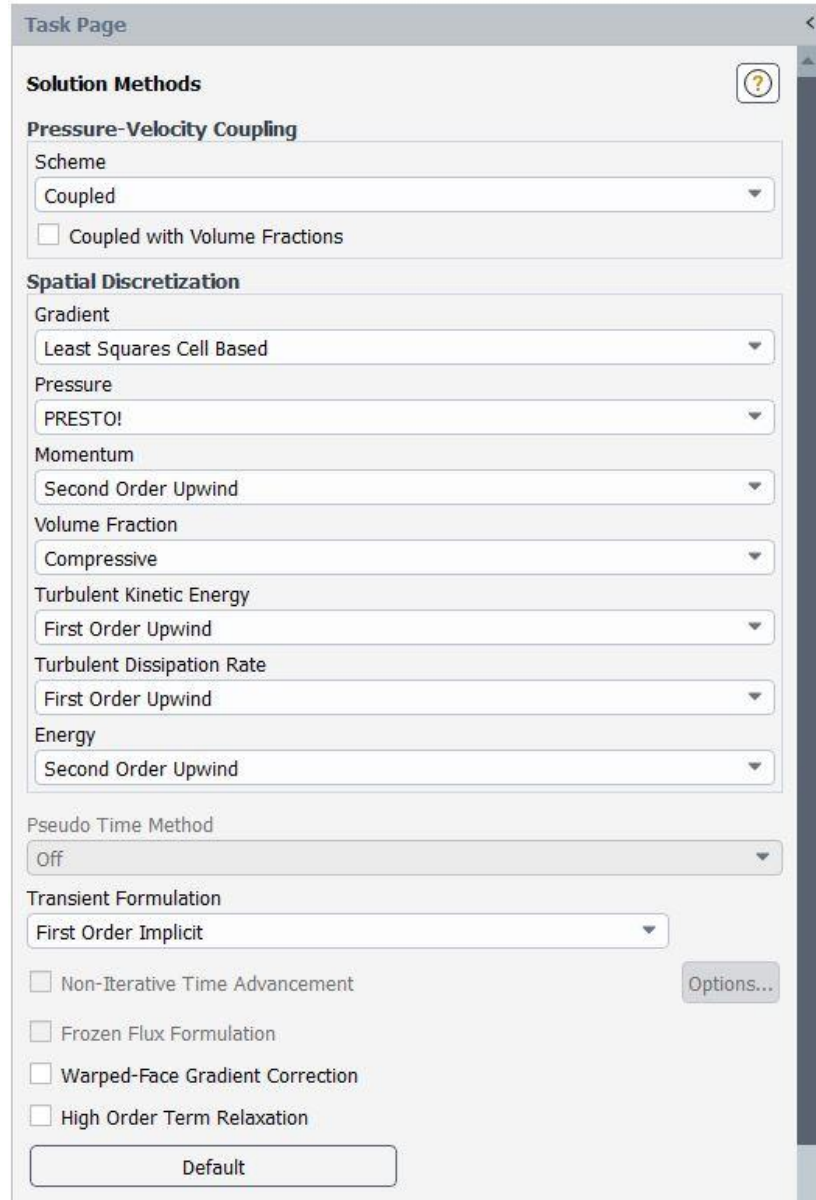
Şekil 3.17. 1'inci model giriş ve çıkış vektörleri

Hız giriş şartı 2 m/s olarak girilmiştir (Şekil 3.18). Akış hacmi girişinin (inlet) tamamen solvent olduğunu tanımlamak volume fraction değeri 1 olarak girilmiştir.



**Şekil 3.18.** 1 nolu model hız giriş sınır şartı

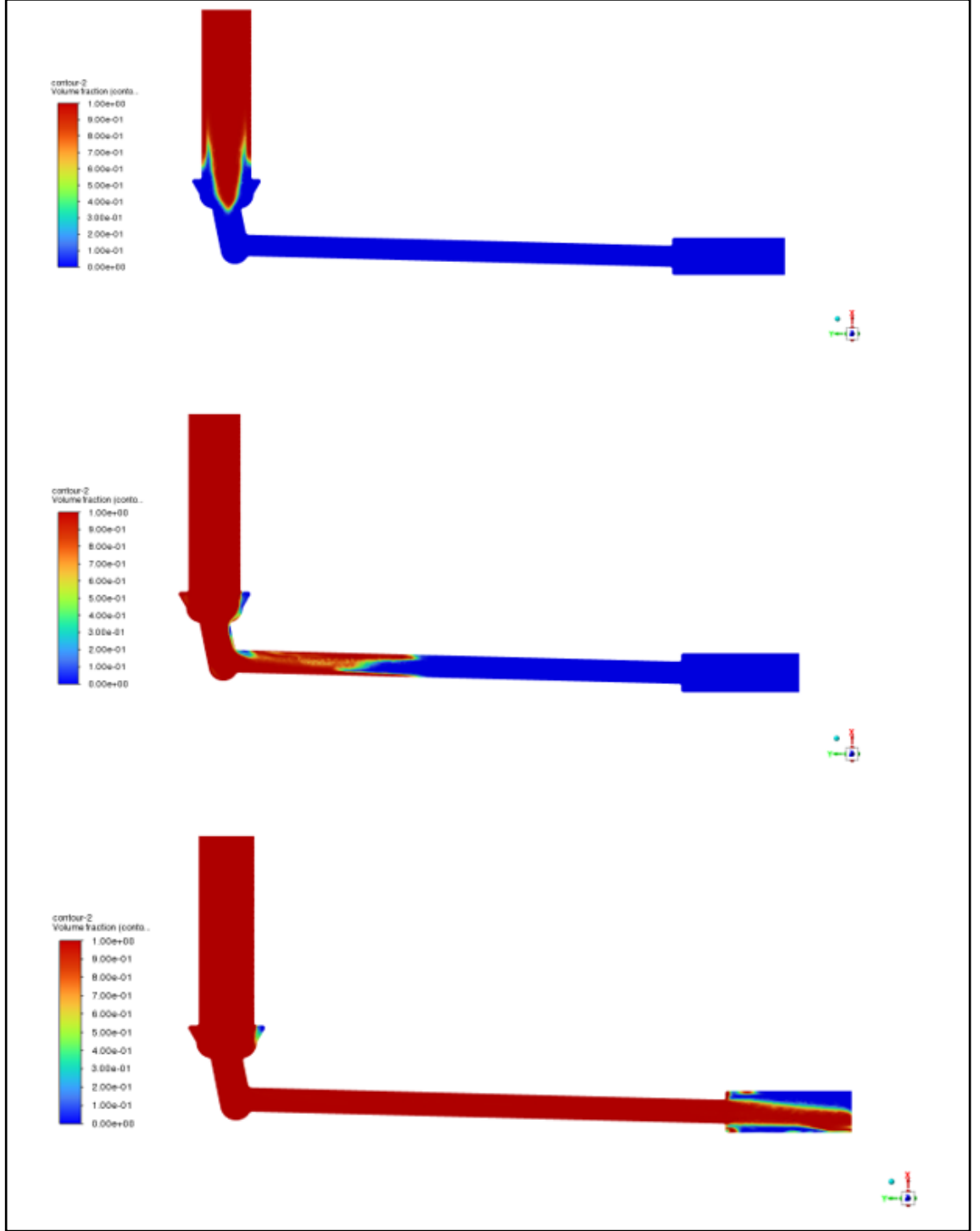
Birleşik hız ve basınç denklemlerinde Coupled algoritması kullanılmış ve terimlerin ayrıklaştırılmasında birinci derece çözümlerden faydalanılmıştır (Şekil 3.19). Yakınsatma faktörleri için varsayılan değerler (basınç 0,75; momentum 0,75; türbülans özellikleri 0,8) alınmış; yakınsama kriteri de  $10^{-6}$  olarak seçilmiştir.



**Şekil 3.19.** HAD analizleri birleşik hız ve basınç denklemleri modülü

Analiz zaman adımı 250 ve zaman adımı uzunluğu 0,01 olarak tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler tekrarlanarak çalıştığı kontrol edilmiş, zaman adımı uzunluğu ve zaman adımı değerleri artırılarak analizler tekrarlanmıştır. 1 nolu analiz için gerçekleştirilen tüm adımlar kalan 8 analiz içinde gerçekleştirilmiştir. ilk aşama analizleri ardından ikinci aşama analizleri gerçekleştirilmiştir. 3 modelden oluşan analizlerde tek fark faz sıralarının değiştirilmesidir. birinci faz akış hacminde olan solvent ikinci faz ise giriş noktasındaki hava olarak tanımlanmıştır. İkinci aşama analizleri de bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Ağdan bağımsızlık çalışmalarında tüm

modellerin ağ eleman sayıları değiştirilerek HAD analizlerindeki tüm sistematik tekrar edilmiştir. Modellerin akış içerisindeki akış karakteristiğinin yakın ağ yapılarında da değişmediği görülmüştür.



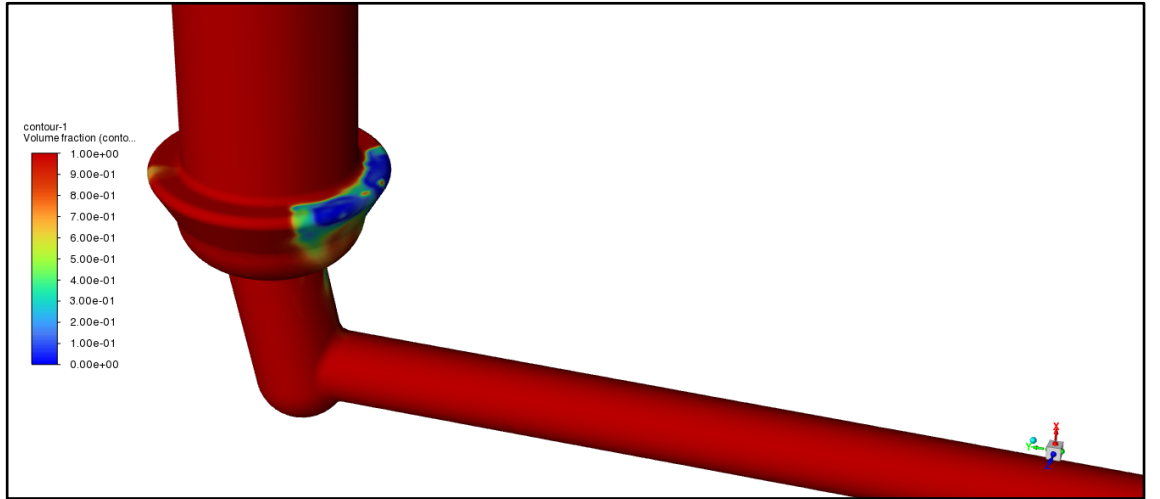
Şekil 3.20. Öncül HAD analiz sonuçları

#### 4.BULGULAR ve TARTIŞMA

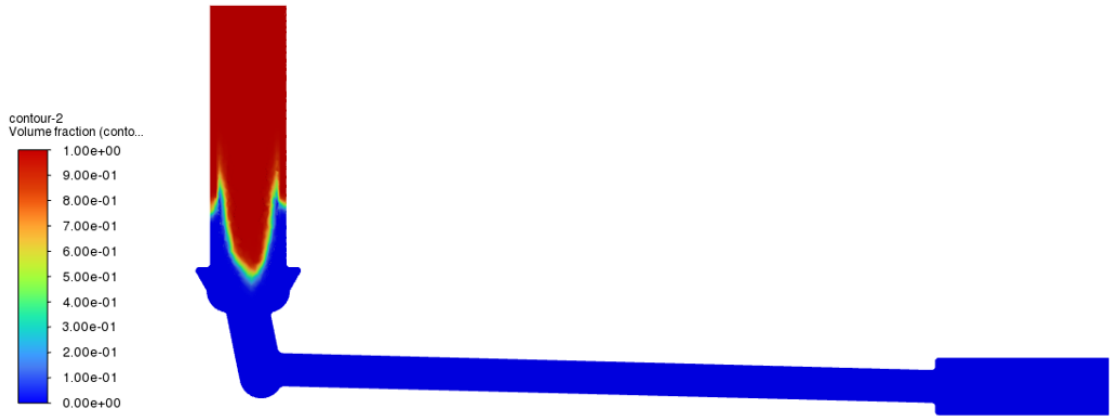
İçerisinde hava bulunan enjektör deliğine solvent ile akış uygulanarak çok fazlı akış analizi uygulanmış ve delik içerisinde solvent ve havanın etkileşimi ile oluşan akış karakteristikleri incelenmiştir. akışkanının delik içerisindeki tüm yüzeylere temas ettiği ve solventin akış hacmini tamamen ne kadar sürede doldurduğu kayıt altına alınmıştır.

Elde edilen analiz görselleri bu bölümde irdelenecektir.

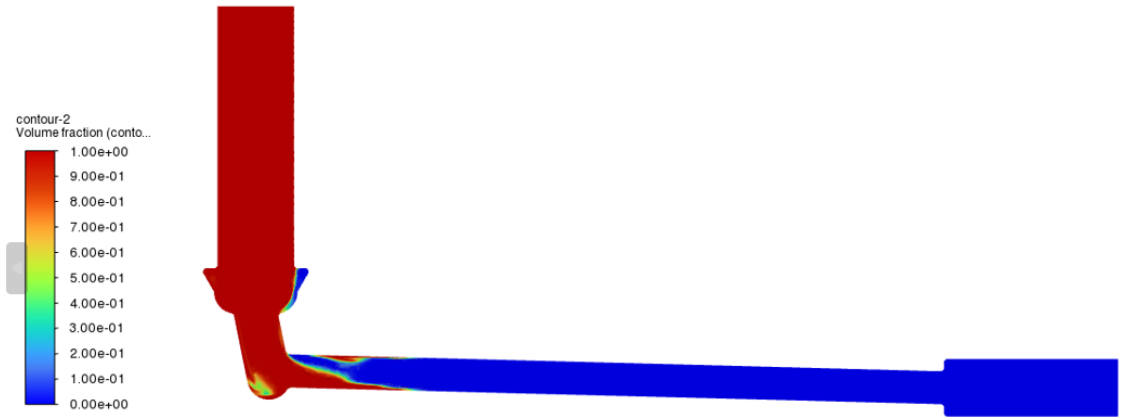
Şekil 4,1'de yer alan görsellerde akış hızının lüleyi sabit bir hızla geçerek lülenin tamamının solvent ile kaplandığı görülmektedir. Akışkan enjektör hacmine ulaştığında enjektörün kademeli giriş çapına çarparak hava ile karıştığı gözlemlenmiştir. İki deliğin birleştiği noktada hava kabarcıkları asılı kalmış ve kabarcıklar lüle ile enjektör deliğinin temas noktalarında birikmiştir. 1,02 s sürede solvent 1,9 mm çapa sahip delikten ilerlemeye başlamıştır. Solvent enjektör gövdesi çıkış deliğine ulaştığında hava içerisinden kendine kanal oluşturarak akışına devam ettiği belirlenmiştir. Akışın devamında nozul ve enjektör gövdesi temas noktalarının köşelerinde hava baloncukları stabil halde durmaya devam ettiği gözlemlenmiş, enjektör gövdesinin kalan %99 hacminin solvent ile kaplandığı ve akışın devam ettiği belirlenmiştir.



**Şekil 4.1.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 1 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu



(a)

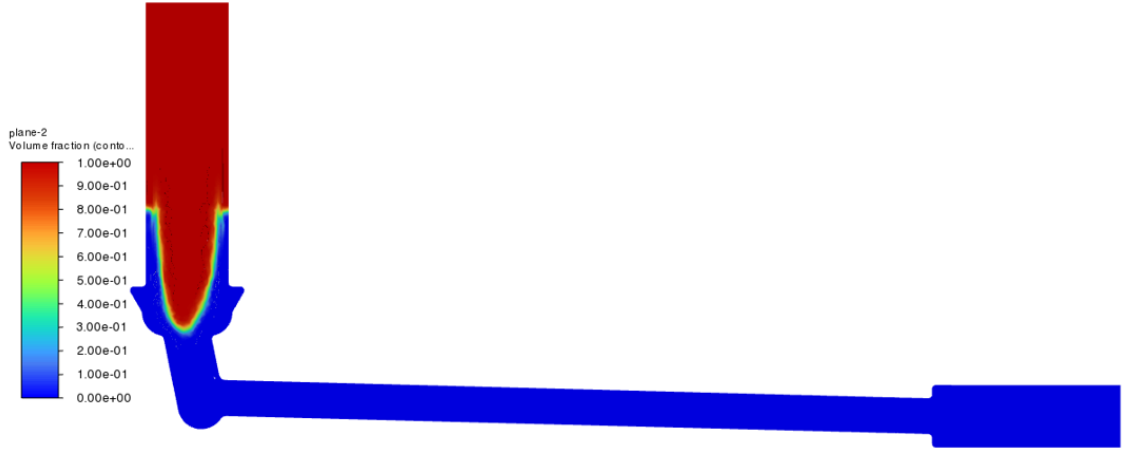


(b)

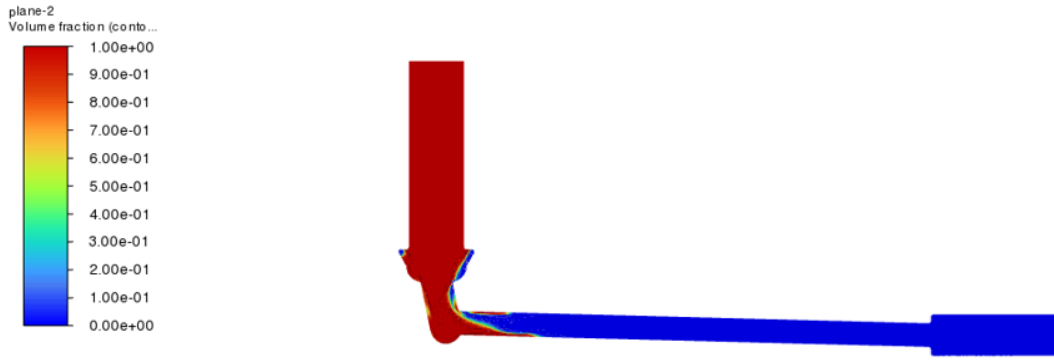


(c)

**Şekil 4.2.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 1 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar



(a)



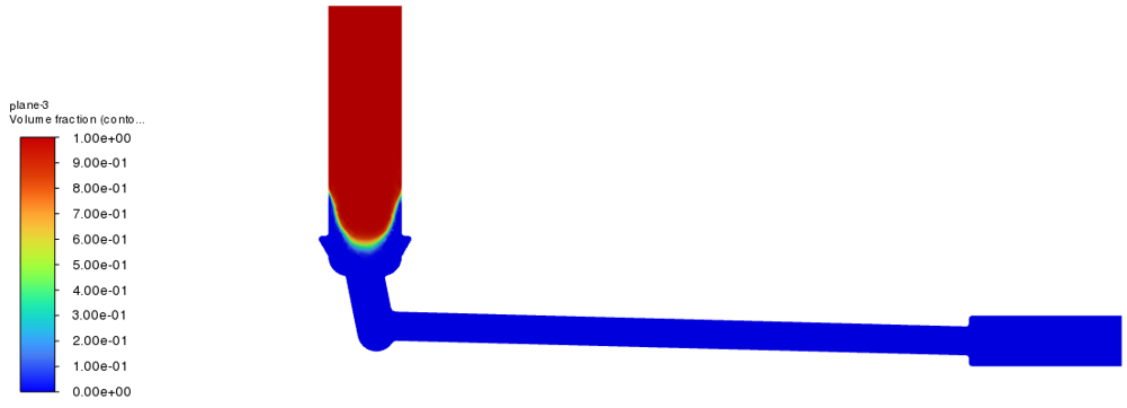
(b)



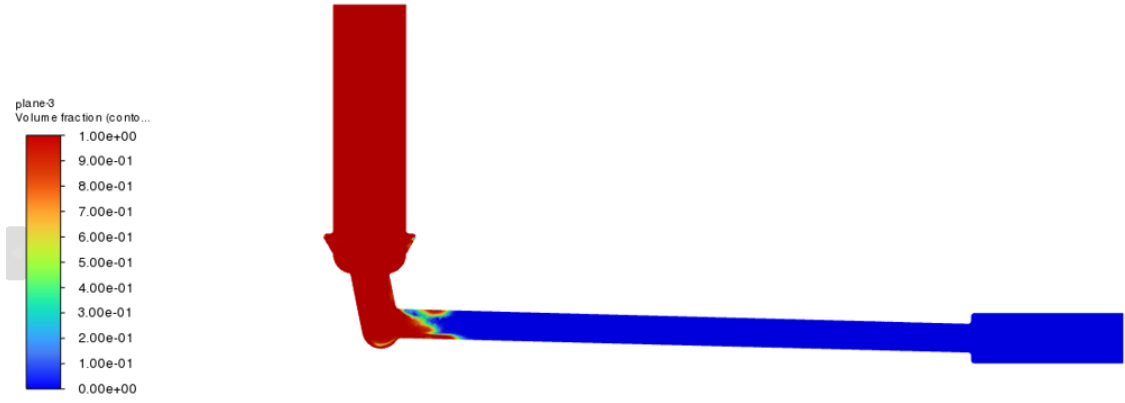
(c)

**Şekil 4.3.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 2 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar

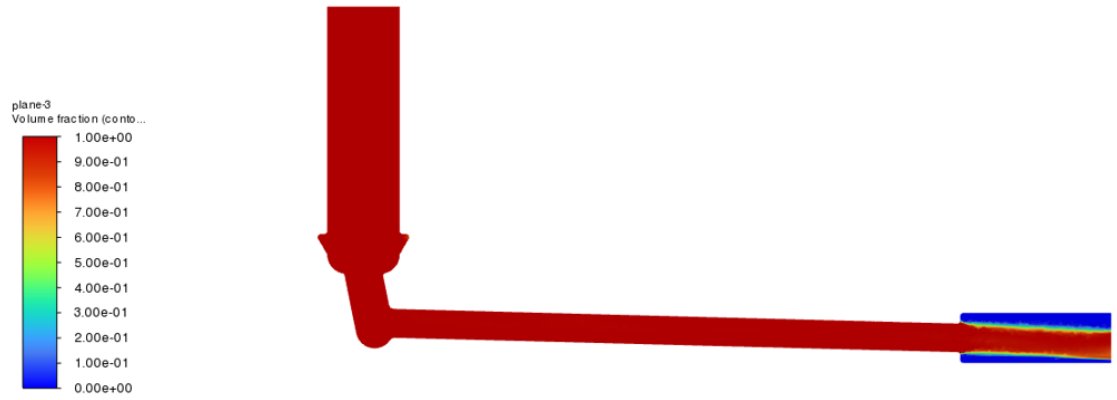




(a)

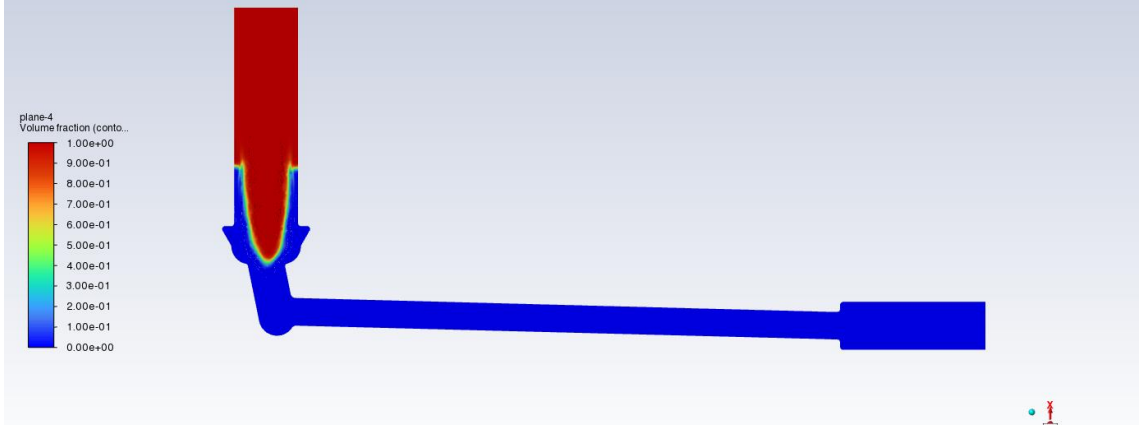


(b)

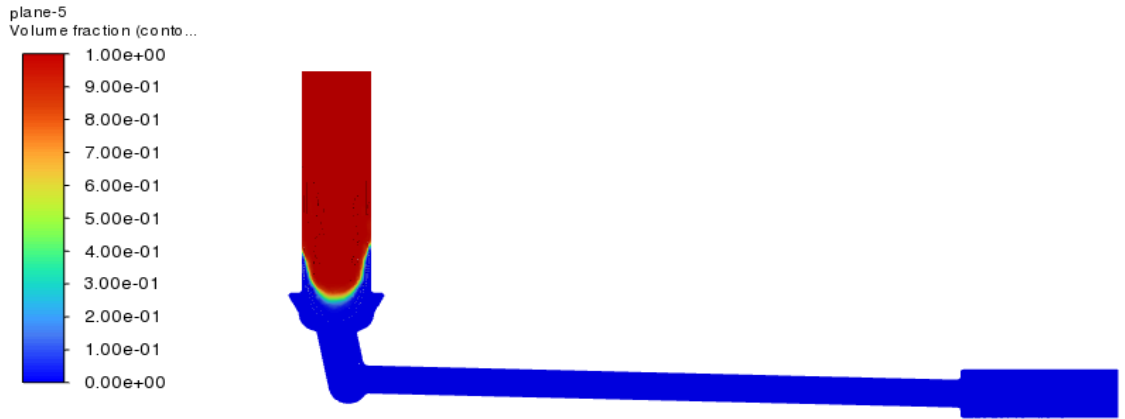


(c)

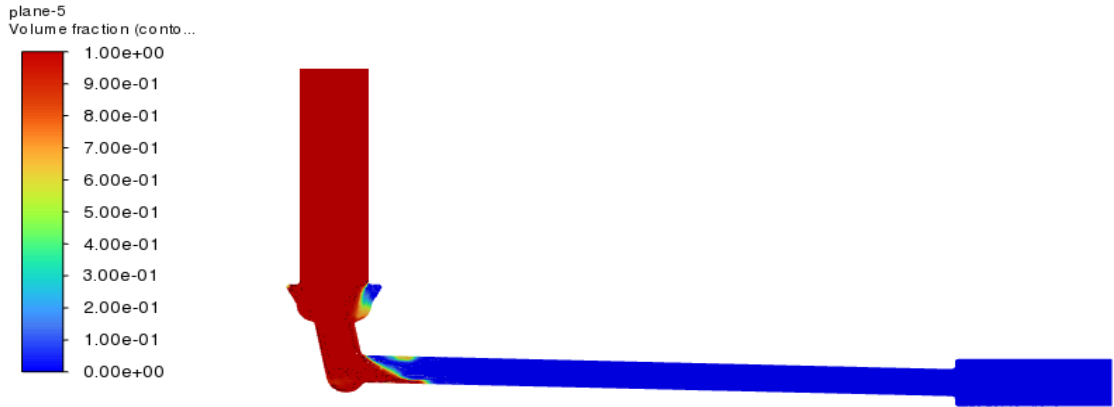
**Şekil 4.4.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 3 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar



**Şekil 4.5.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 4 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar



(a)

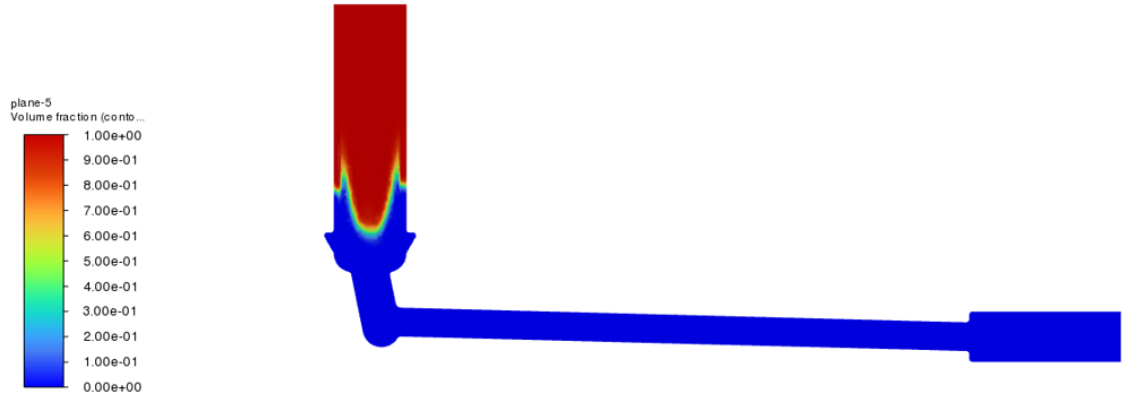


(b)

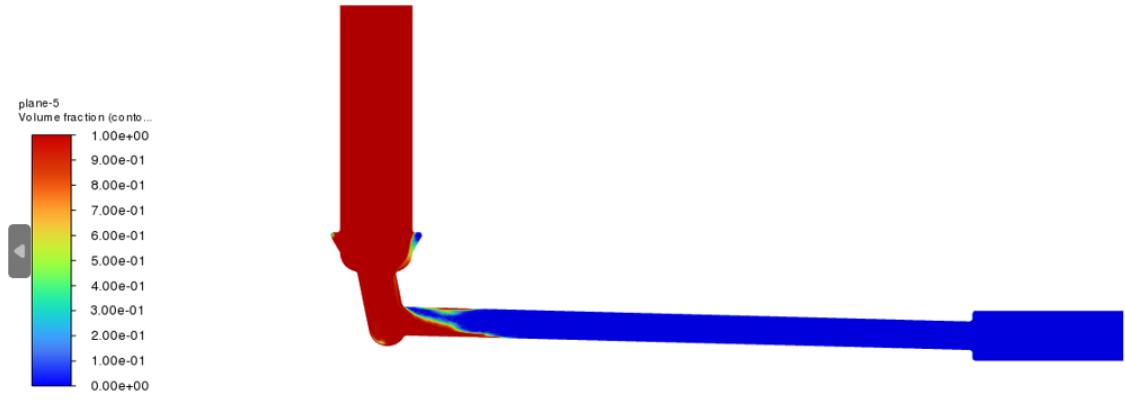


(c)

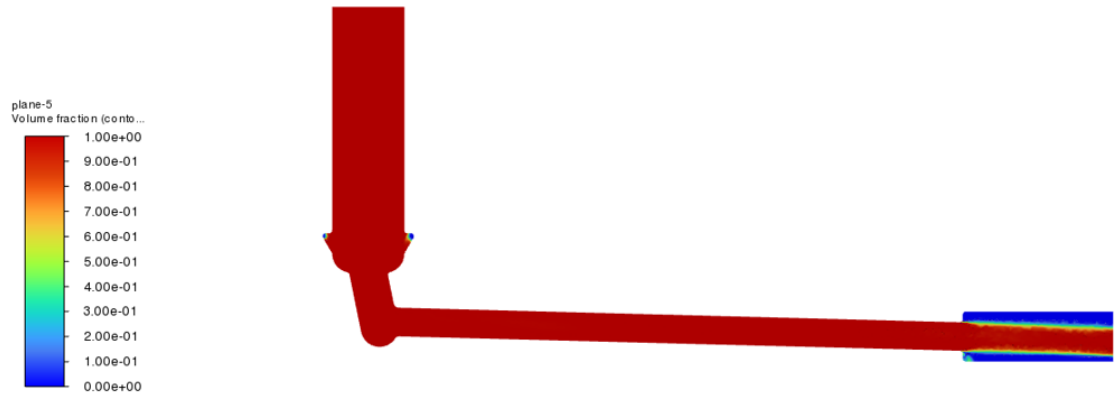
**Şekil 4.6.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 5 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar



(a)

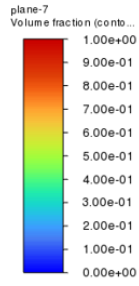


(b)

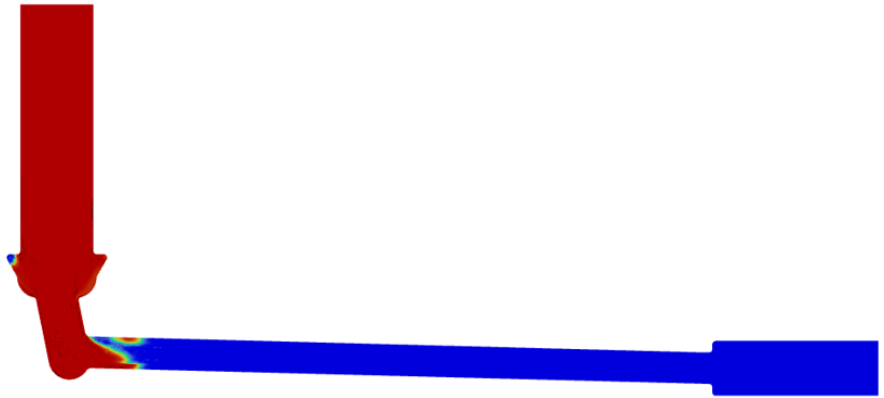
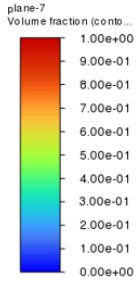


(c)

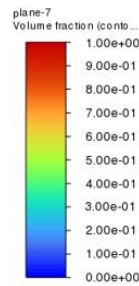
**Şekil 4.7.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 6 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar



(a)

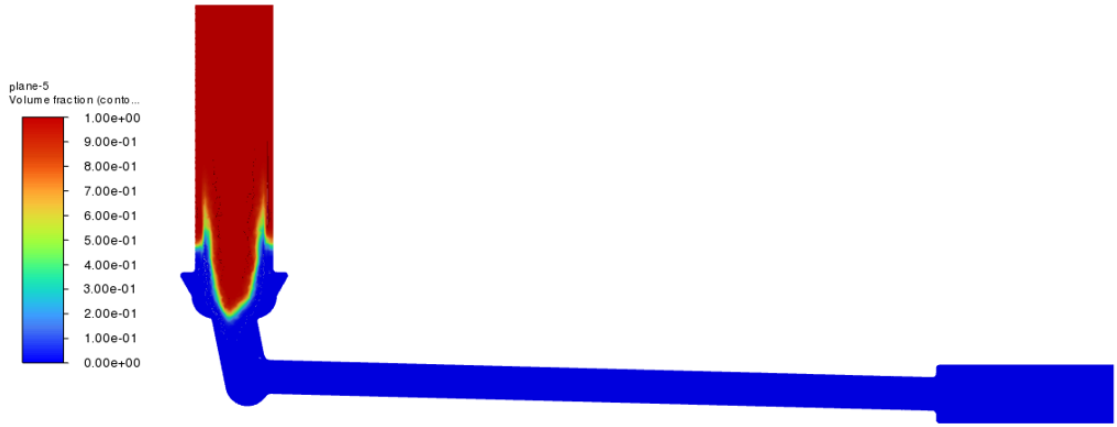


(b)

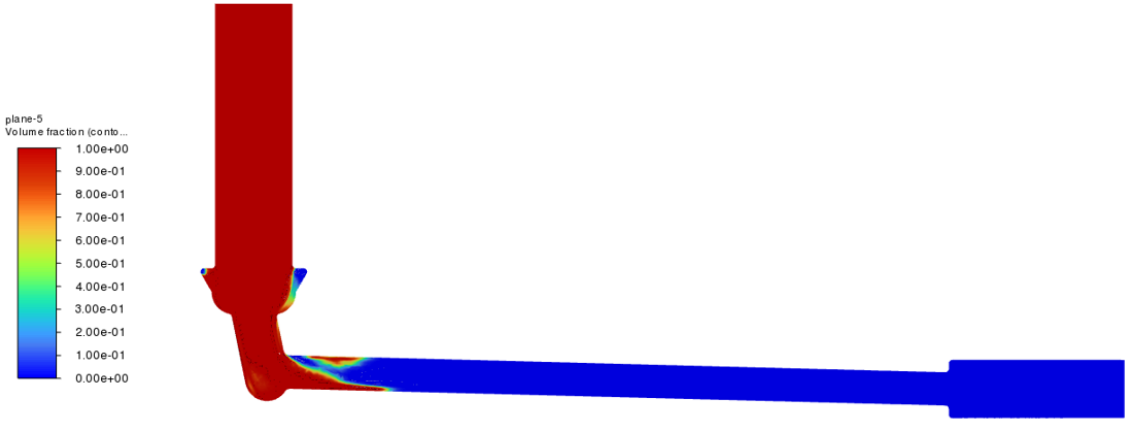


(c)

**Şekil 4.8.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 7 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar



(a)

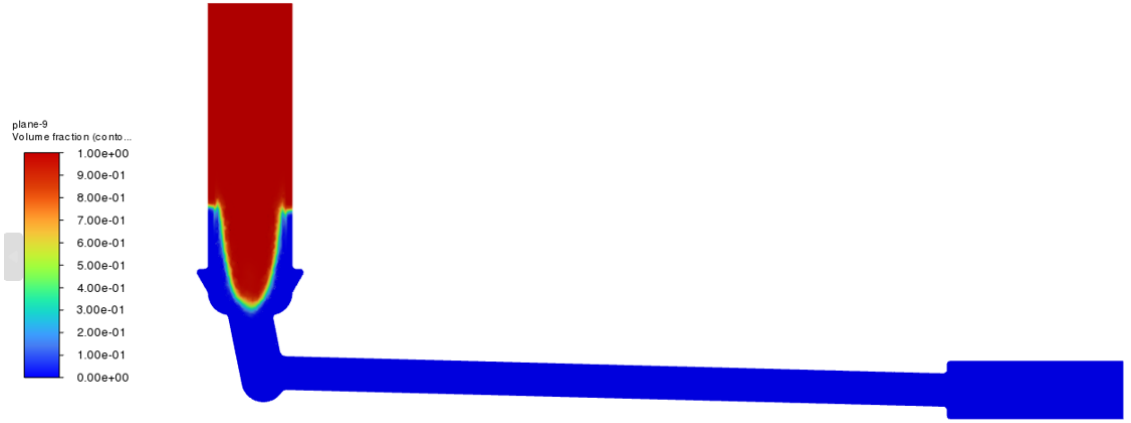


(b)

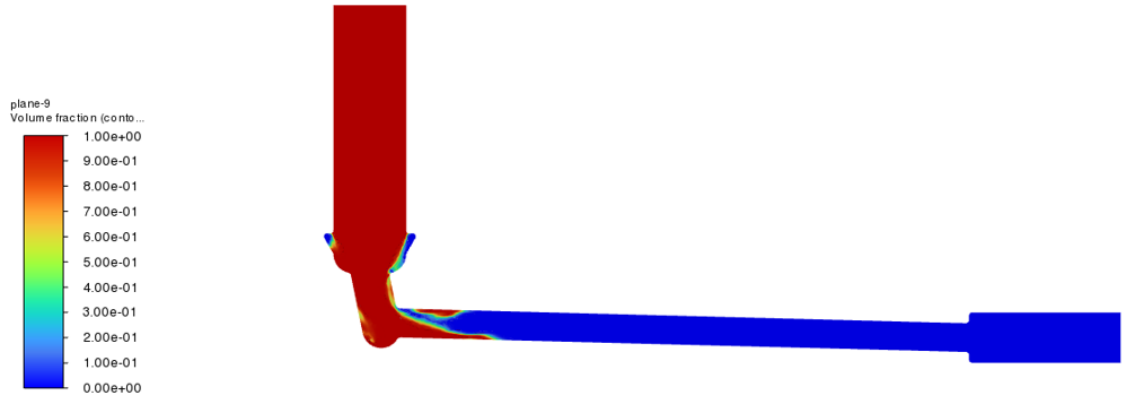


(c)

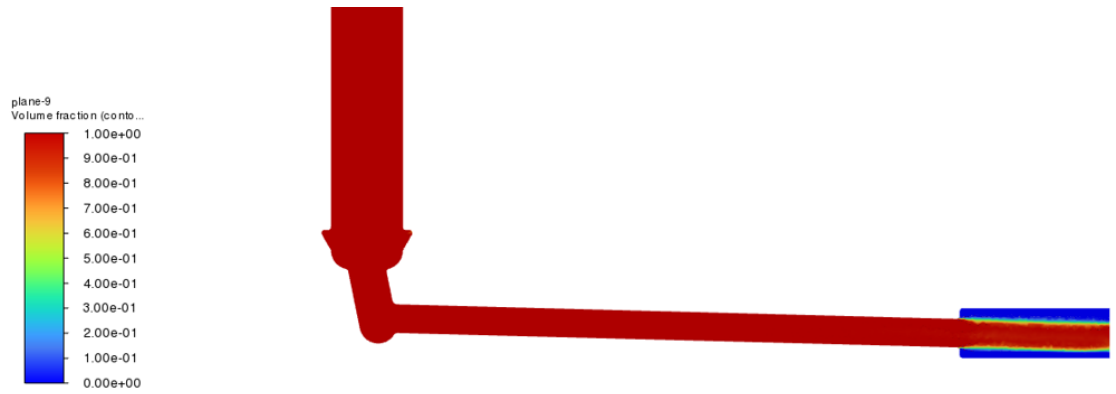
**Şekil 4.9.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 8 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar



(a)

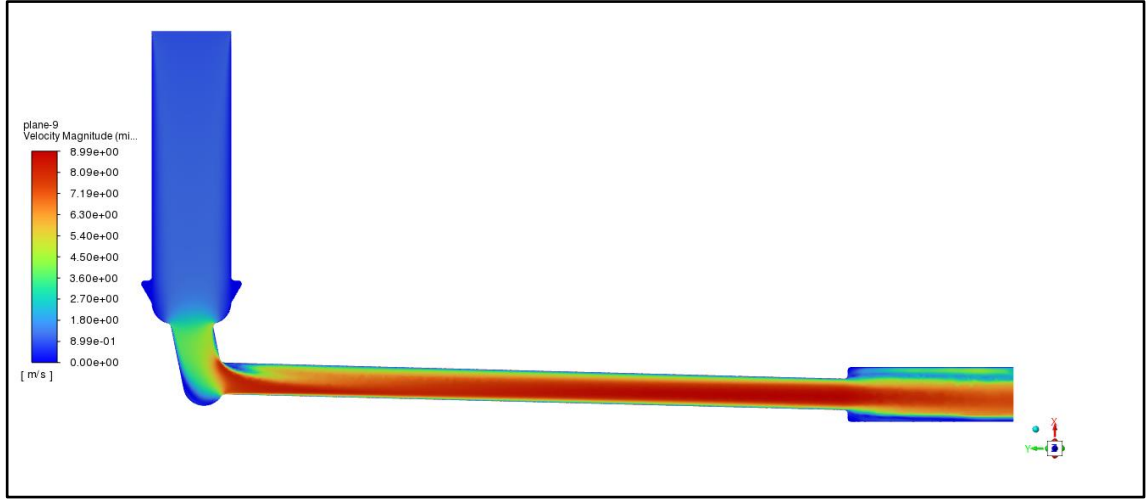


(b)



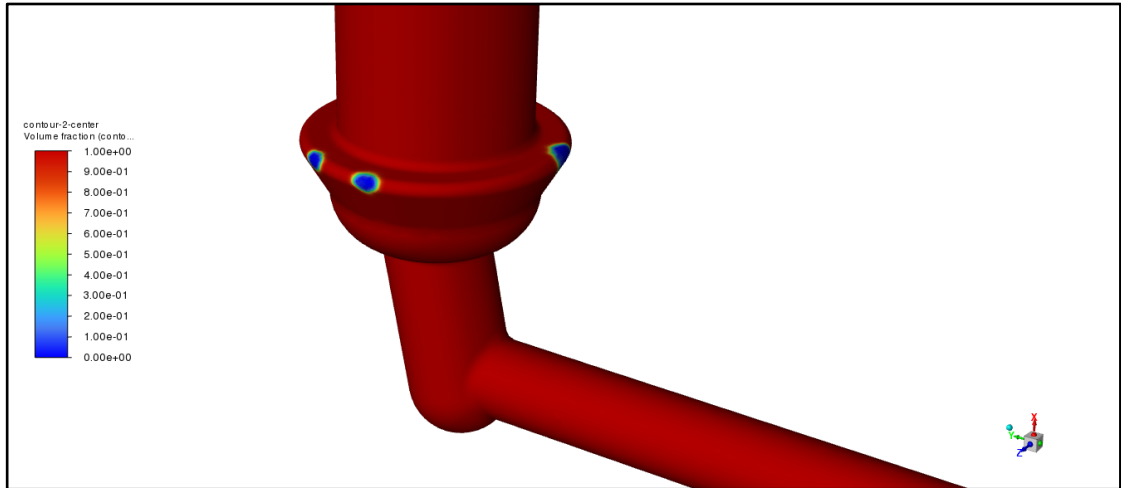
(c)

**Şekil 4.10.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 9 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu, a)  $t=0,35$ , b)  $t=0,70$  ve c)  $t=2,00$  s zamanındaki durumlar



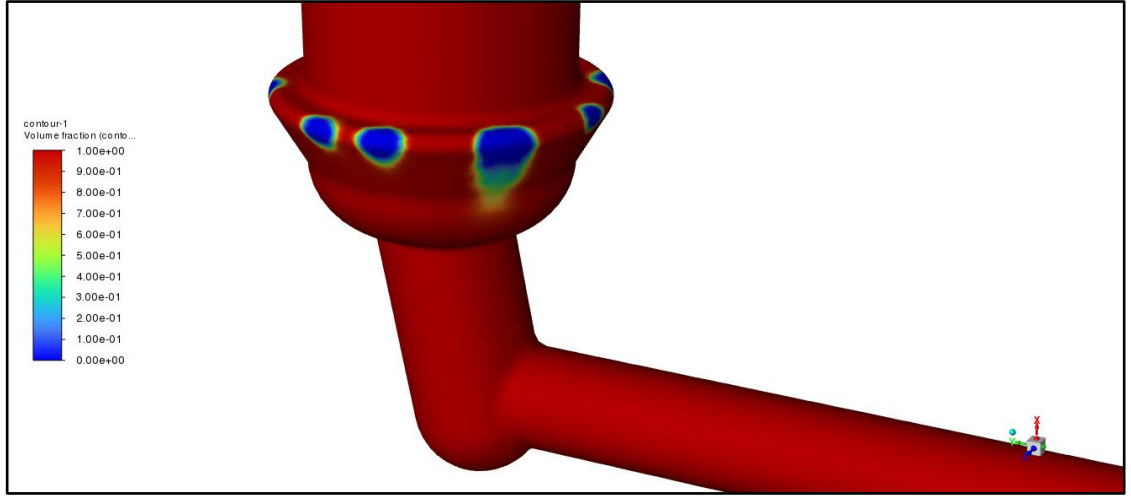
**Şekil 4.11.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 9 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizler sonucu delik içi akış hızı görseli

Yapılan Analizlerde lüle ile enjektör giriş deliği temas noktalarında oluşan hava kabarcıkları görsellerde paylaşılmıştır. Lüle çapına bağlı olarak hava kabarcıklarının büyüklüğü değişmektedir.

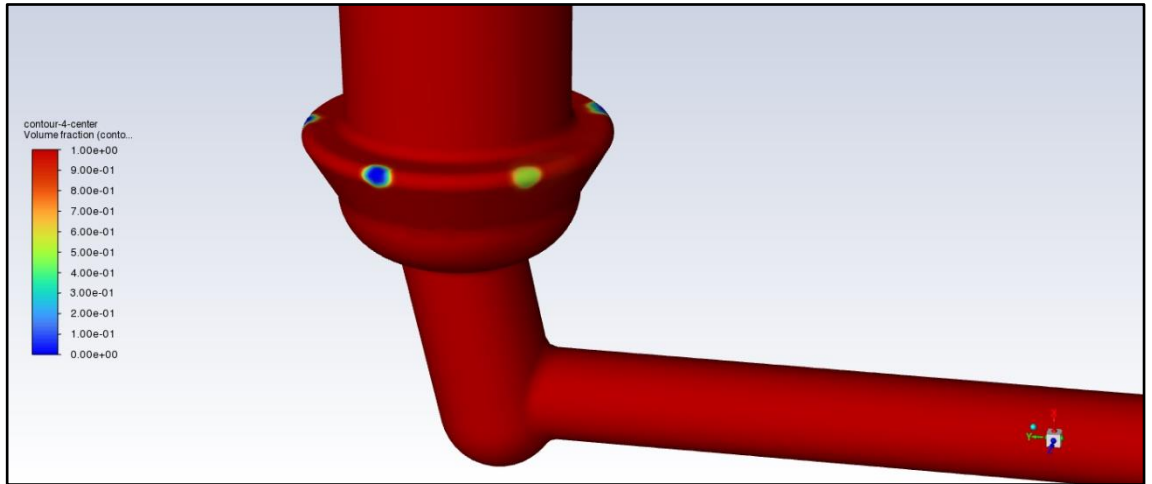


**Şekil 4.12.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 2 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu

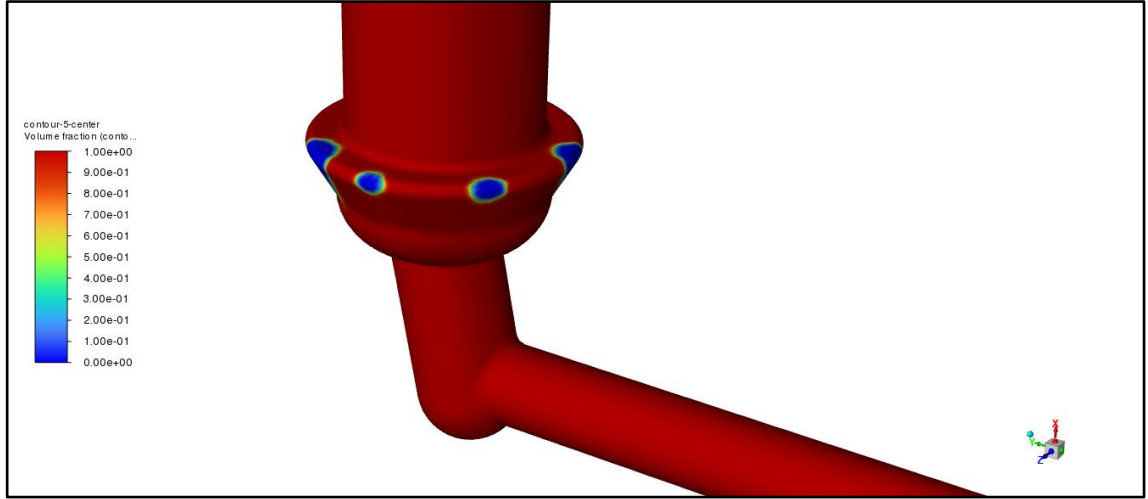




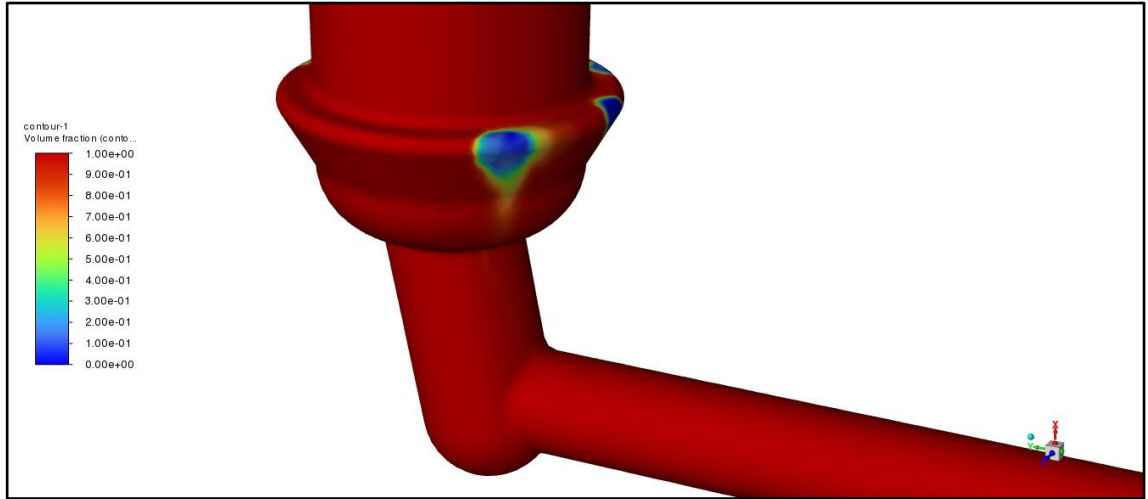
**Şekil 4.13.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 3 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu



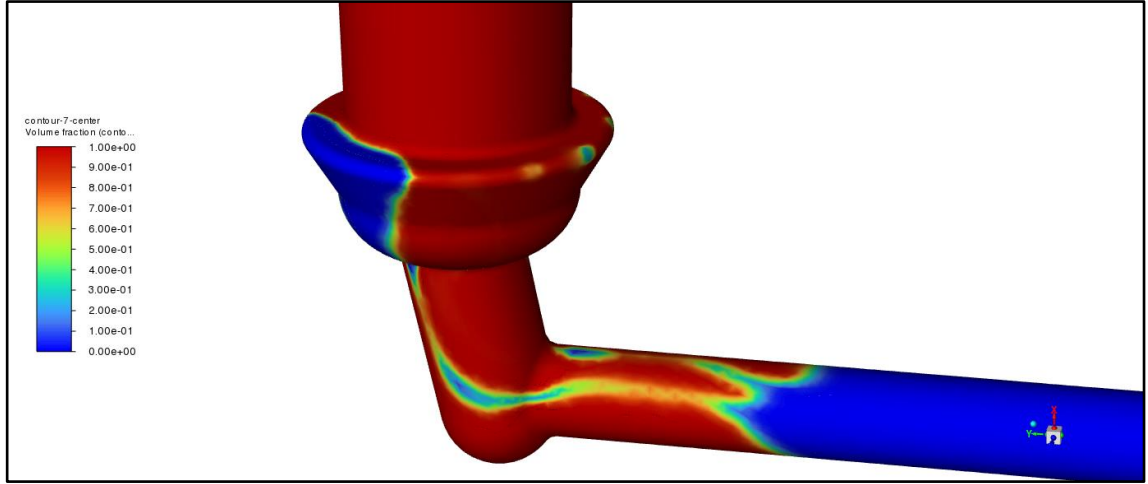
**Şekil 4.14.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 4 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu



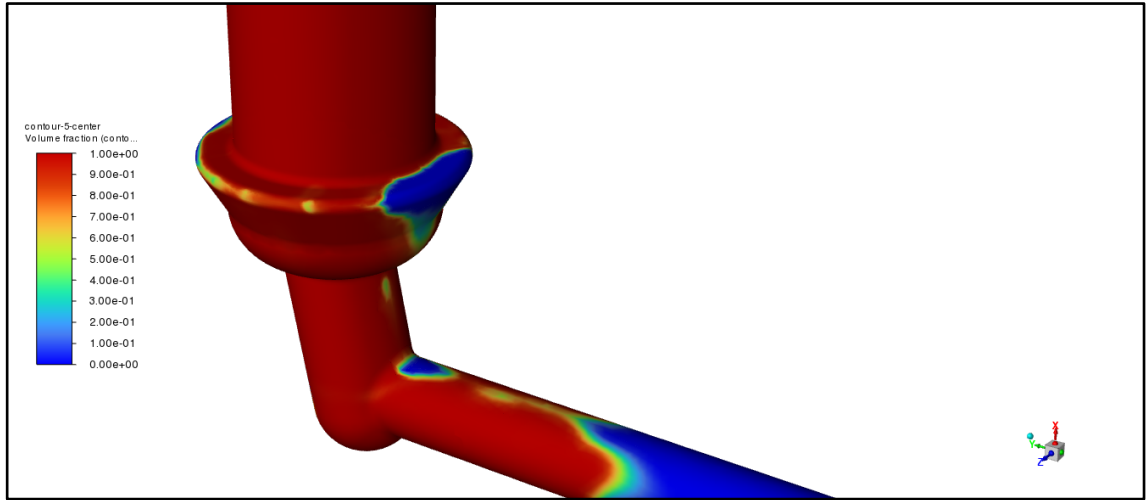
**Şekil 4.15.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 5 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu



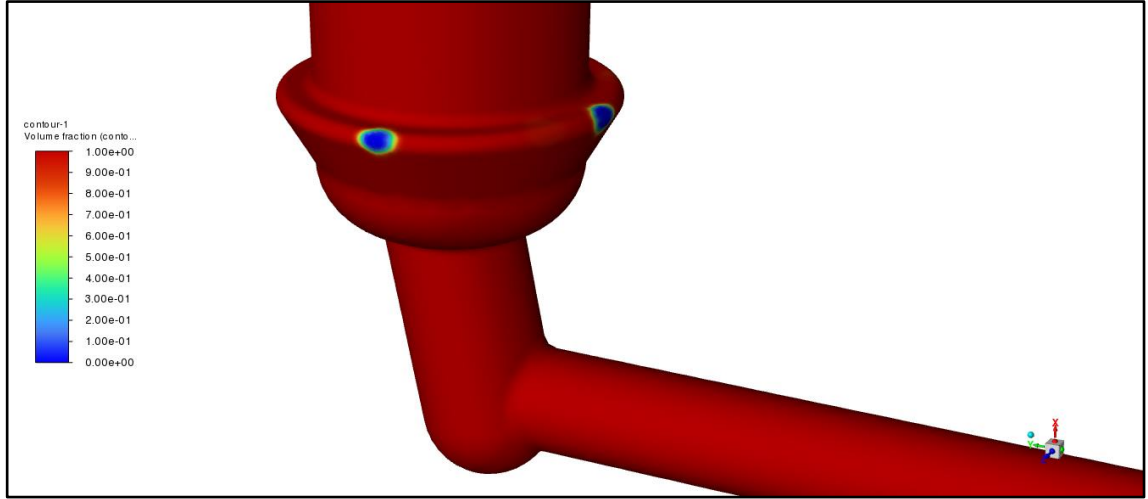
**Şekil 4.16.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 6 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde temas bölgesi akış durumu



**Şekil 4.17.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 7 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde  $t=0,70$  s anındaki temas bölgesi akış durumu



**Şekil 4.18.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 8 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde  $t=0,70$  s anındaki temas bölgesi akış durumu

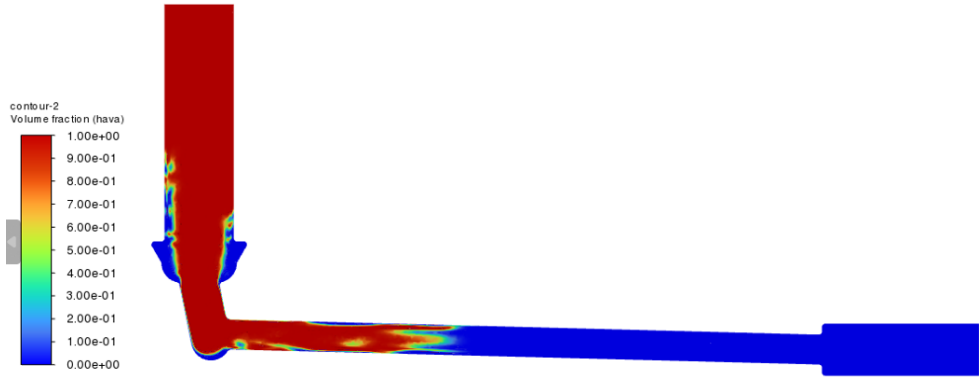


**Şekil 4.19.** Taguchi L9 deneysel tasarımında yer alan 9 nolu seviye kombinasyonları kullanılarak yürütülen analizlerde  $t=2,00$  s anındaki temas bölgesi akış durumu

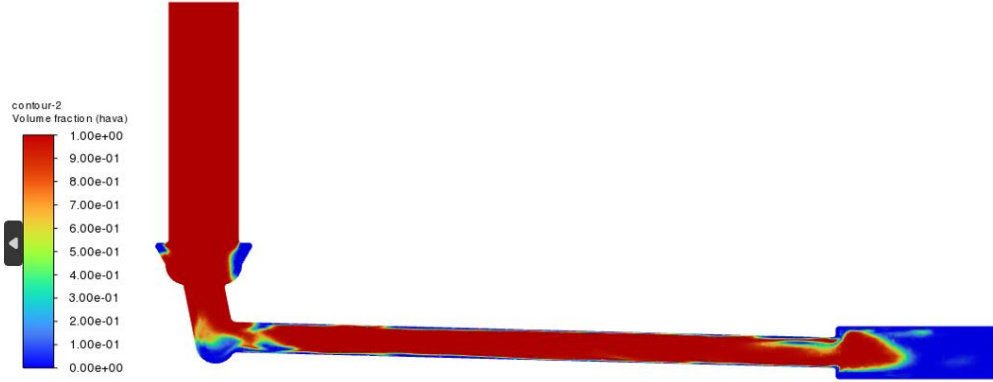
Tüm analizlerin gerçekleşmesi ardından enjektör delik akış yüzeyinin tamamen solvent/çözücü ile dolduğu öngörülmüş ve HAD analizleri ile bu durum doğrulanmıştır. İkinci aşamada akış içerisinde gönderilen solvent kesilmiş, ardından delik içerisi tamamen solvent dolu iken delik içerisine hava basılmıştır. Birinci aşama analizlerinin tersine ikinci aşamada giriş fazı hava olduğundan delik içerisinden çok fazla türbülans ve çalkalanma gözlemlenmiştir. Lüleden enjektör deliğine geçişte delik geometrisi havayı ters itmekte ve temas bölgesinde vorteks akışı meydana gelmektedir.



(a)



(b)

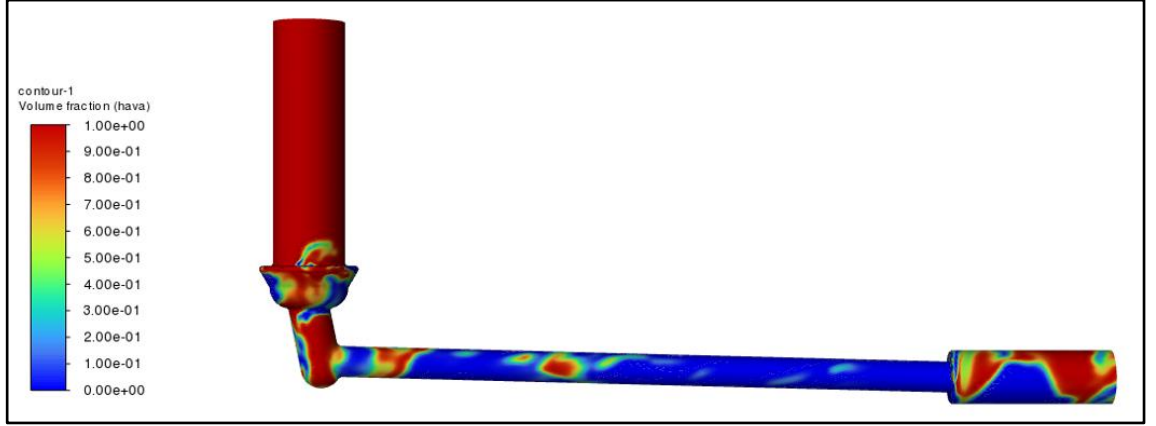


(c)

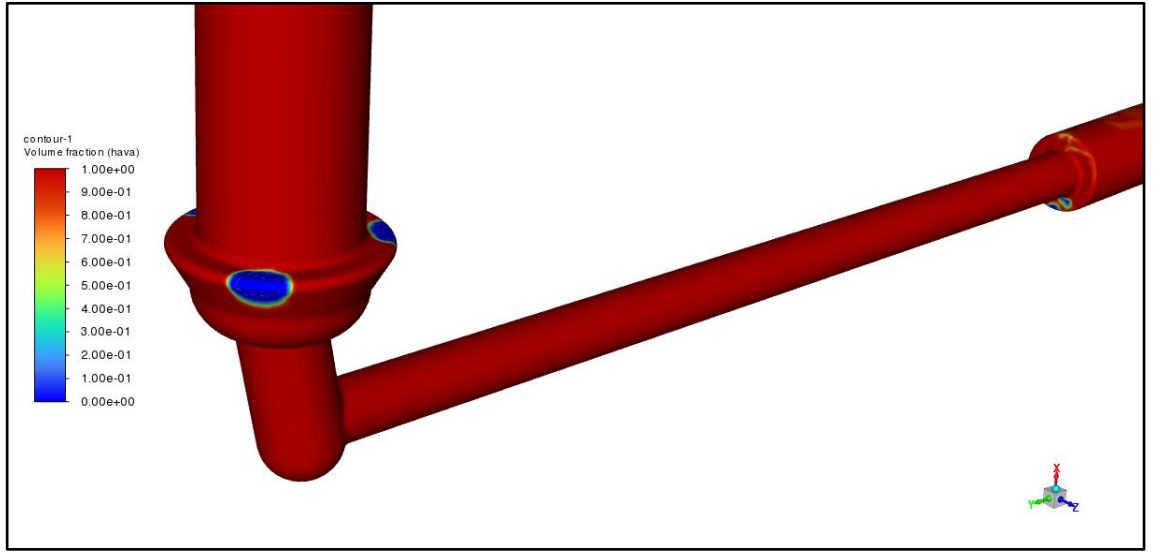


(d)

**Şekil 4.20.** İkinci aşama analizleri deneysel tasarımda yer alan 1 nolu hava uygulaması a)  $t=0,18$ , b)  $t=0,36$ , c)  $t=0,70$  ve d)  $t=1,80$  s aralıklarındaki akış karakteri

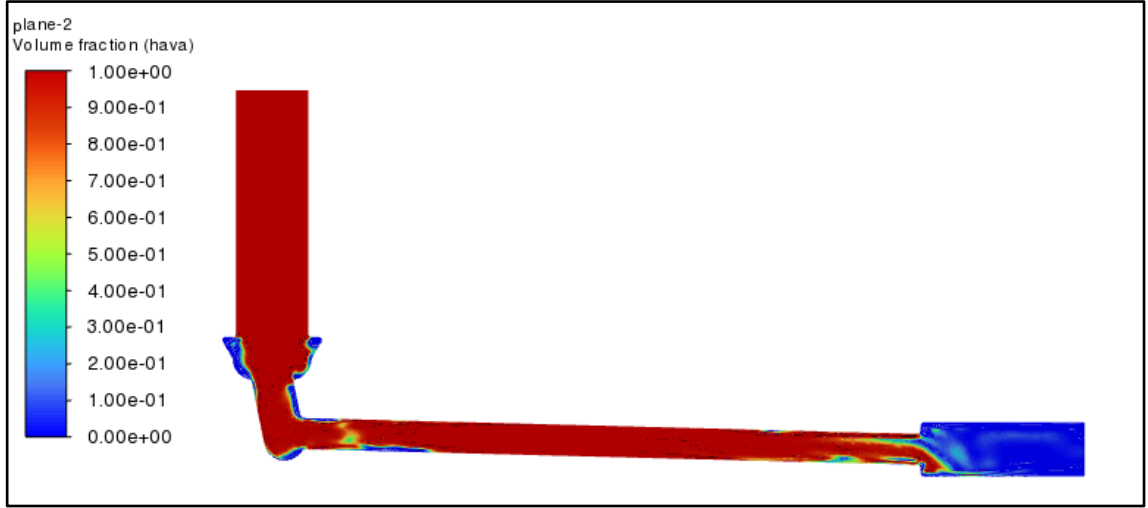


**Şekil 4.21.** İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 1 nolu hava uygulaması  $t=0,9$  s anında 3 boyutlu analiz



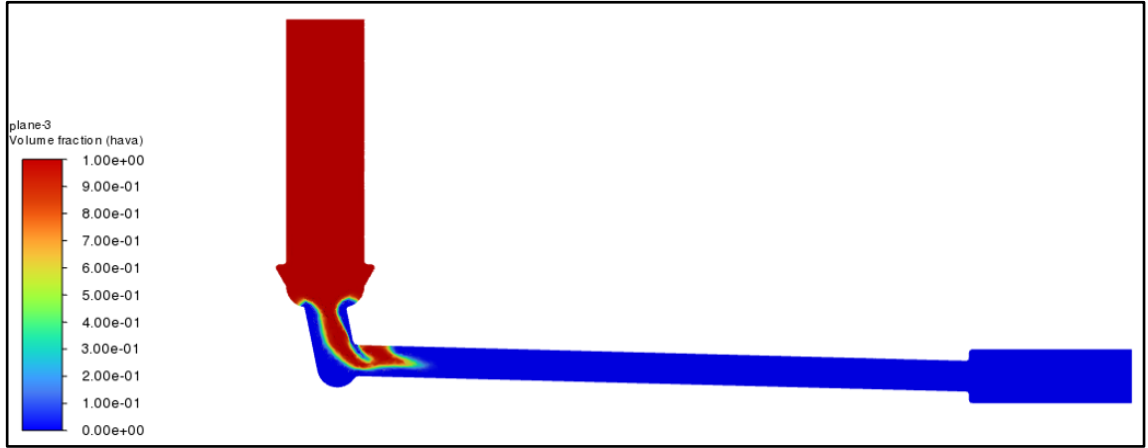
**Şekil 4.22.** İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 1 nolu hava uygulaması  $t=1,80$  s anında 3 boyutlu analiz

4,4 mm çapa sahip enjektör modelinde uygulanan hava ile öteleme modelinde ilk modele göre akışkanın daha yavaş ve kararlı ilerlediği görülmüştür. Temas noktasında oluşan girdaplar ilkinde nazaran daha az bulunmuş ve sıvı akışkan delik hacminden uzaklaşmıştır. Burada lüle çapındaki artışın akış karakterini etkilediği görülmüştür.

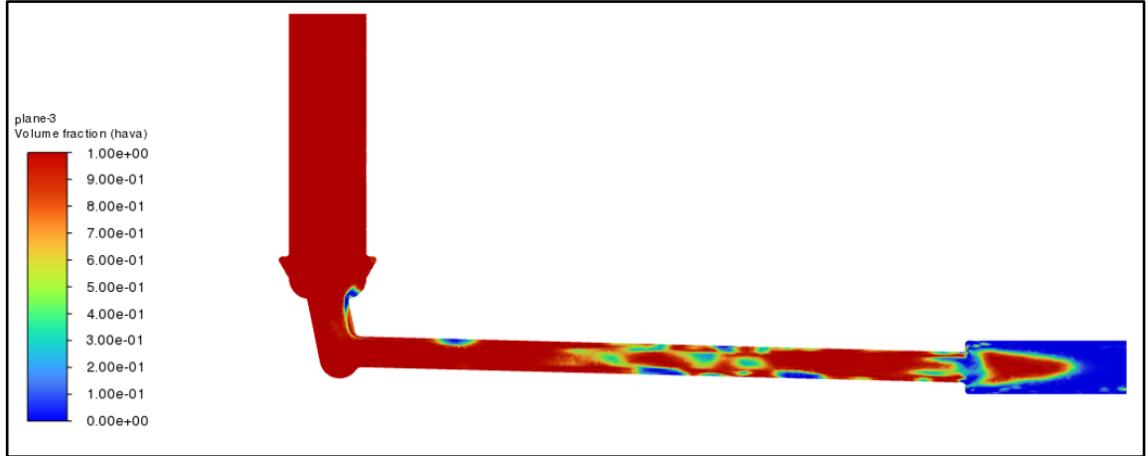


**Şekil 4.23.** İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 2 nolu hava uygulaması  $t=1,50$  s anında 2 boyutlu analiz

İlk iki analize nazaran son analizde akış girdapları en az seviyeye inmiş fazlar arası karışım en az seviyede olacak şekilde solvent delik içerisinden uzaklaşmaya başlamıştır (Şekil 4.24).



**Şekil 4.24.** İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 3 nolu hava uygulaması  $t=0,15$  s anında 2 boyutlu analiz



**Şekil 4.25.** İkinci aşama analizleri deneysel tasarımında yer alan 3 nolu hava uygulaması  $t=0,40$  s anında 2 boyutlu analiz

Çıkan analizler görsellerle değerlendirilmiş ardından çıktılar istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve optimal parametreler elde edilmiştir.

Çalışmada elde edilen verilerde akışkanın hızının delik içi çıkış hızı ve toplam temizlik süreleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 4.1’de paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.1.** Taguchi’nin L9(3)3 deney tasarımıyla gerçekleştirilen HAD analizleri sonuç tablosu

| No | Solvent  | Lüle Çapı, mm | Giriş Hızı, m/s | Çıkış Hızı, m/s | Süre, s |
|----|----------|---------------|-----------------|-----------------|---------|
| 1  | Solvent1 | 4             | 2,00            | 7,842           | 2,320   |
| 2  | Solvent1 | 4,4           | 1,00            | 7,180           | 2,189   |
| 3  | Solvent1 | 4,8           | 0,50            | 4,330           | 2,210   |
| 4  | Solvent2 | 4             | 1,00            | 7,167           | 2,110   |
| 5  | Solvent2 | 4,4           | 0,05            | 3,813           | 2,197   |
| 6  | Solvent2 | 4,8           | 2,00            | 17,160          | 2,200   |
| 7  | Solvent3 | 4             | 0,05            | 5,230           | 2,180   |
| 8  | Solvent3 | 4,4           | 2,00            | 14,520          | 2,170   |
| 9  | Solvent3 | 4,8           | 1,00            | 8,993           | 2,202   |



Yürütülen HAD analizlerinden elde edilen çıktılar Minitab 20 programı kullanılarak istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Her bir parametrenin etki derecesinin tespit edilmesi için gerçekleştirilen istatistiksel veri analizi çalışması, elde edilen bu veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Parametrelerin temizleme performansını tanımlayan ve Tablo 4.1’de sunulan Kalıntı AFM Macunu değeri üzerindeki etkileri ve bu değerin minimum olmasını sağlayacak optimal seviye kombinasyonu araştırılmıştır. Kalıntı AFM Macunu değerinin minimum olduğu seviye kombinasyonunun belirlenmesi için Taguchi’nin performans karakteristiği olarak “En Düşük – En İyi” seçilmiştir (Denklem 3.11). Parametrelerin seviye kombinasyonu için hesaplanan S/N değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Taguchi’nin “En Düşük – En İyi” “Sinyal/Gürültü Oranı” denklemi:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.11)$$

Bu çalışma ile parametrelerin temizleme performansı üzerindeki etki sıralaması ve etki yüzdeleri de tespit edilebilmiştir. Taguchi’nin performans karakteristiklerinden S/N oranı için “En Düşük – En İyi” kullanılmış ve parametrelerin Kalıntı AFM Macunu üzerindeki etki sıralaması Tablo 4.2’de verilmiş olup, grafiksel yöntemle de başvurulmuştur (Şekil 4.4).

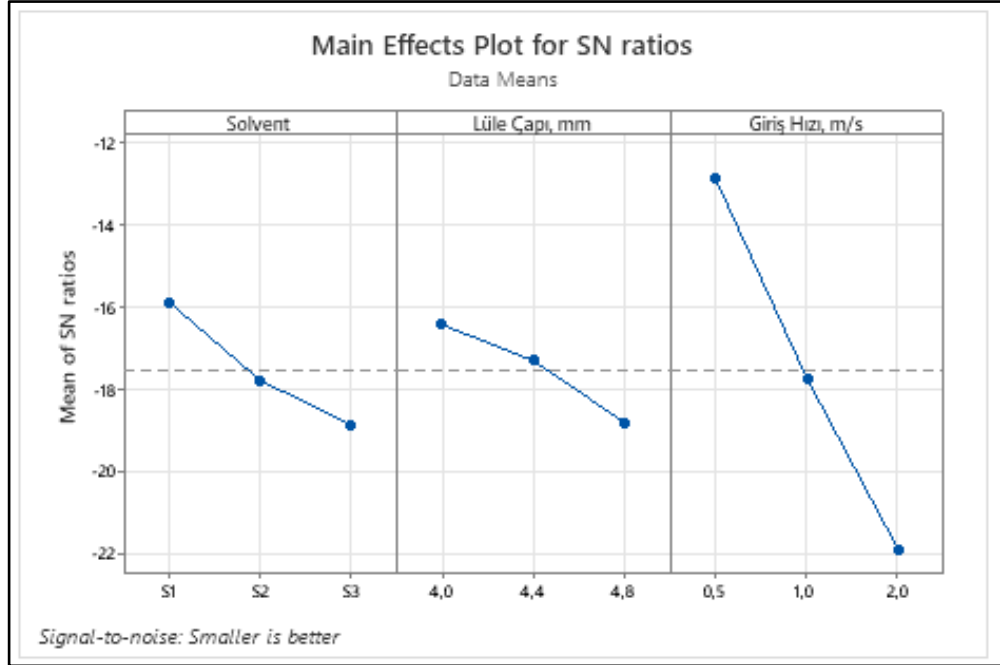
Faktör etkilerinin grafiksel gösteriminin ardından, Minitab 20 programı kullanılarak gerçekleştirilen varyans analizi (ANOVA) çalışması ile Kalıntı AFM Macunu için S/N oranına etki eden parametre katkı yüzdeleri tespit edilmiş olup, bu yüzdeler çizelge 4.2’de sunulmuştur.

**Çizelge 4.2.** Solvent/çözücü ile gerçekleştirilen HAD analizleri sonucu elde edilen gürültü oranı tablosu

| No | Solvent  | Lüle Çapı, mm | Giriş Hızı, m/s | Çıkış Hızı, m/s | Süre, s | S/N Oranı |
|----|----------|---------------|-----------------|-----------------|---------|-----------|
| 1  | Solvent1 | 4             | 2,00            | 7,842           | 2,320   | 17,887    |
| 2  | Solvent1 | 4,4           | 1,00            | 7,180           | 2,189   | 17,122    |
| 3  | Solvent1 | 4,8           | 0,50            | 4,330           | 2,210   | 12,729    |
| 4  | Solvent2 | 4             | 1,00            | 7,167           | 2,110   | 17,106    |
| 5  | Solvent2 | 4,4           | 0,05            | 3,813           | 2,197   | 11,625    |
| 6  | Solvent2 | 4,8           | 2,00            | 17,160          | 2,200   | 24,690    |
| 7  | Solvent3 | 4             | 0,05            | 5,230           | 2,180   | 14,370    |
| 8  | Solvent3 | 4,4           | 2,00            | 14,520          | 2,170   | 23,239    |
| 9  | Solvent3 | 4,8           | 1,00            | 8,993           | 2,202   | 19,078    |

**Çizelge 4.3.** Enjektör gövdesi yakıt deliği temizleme performansına etki eden parametrelerin Kalıntı AFM Macunu üzerindeki etki sıralaması (En Düşük – En İyi)

| Seviye            | Solvent     | Lüle Çapı, mm | Giriş Hızı, m/s |
|-------------------|-------------|---------------|-----------------|
| 1                 | 15,91       | 16,45         | 12,91           |
| 2                 | 17,81       | 17,33         | 17,77           |
| 3                 | 18,90       | 18,83         | 21,94           |
| <b>Maks - Min</b> | <b>2,98</b> | <b>2,38</b>   | <b>9,03</b>     |
| <b>Sıralama</b>   | <b>2</b>    | <b>3</b>      | <b>1</b>        |



**Şekil 4.26.** Parametrelerin S/N oranına etkisinin grafiksel gösterimi

Bu çalışma kapsamında yürütülen ve yukarıda açıklanan, gerek faktör etkilerinin grafiksel gösterim yöntemine dayalı analiz gerekse ANOVA çalışması, enjektör gövdesi yakıt deliği temizleme performansına etki eden giriş parametrelerinin sonuçlara etkisi belirlenmiştir. Çıkış hız ve zamanına etkiyen parametre giriş hızıdır. Ardından solvent termofiziksel özellikleri ve en son olarak giriş lülelerinin çapları etkilemektedir.

**Çizelge 4.4.** Enjektör gövdesi yakıt deliği temizleme performansında etki eden parametrelerin etki yüzdeleri

| Sıralama | Parametreler    | Katkı Yüzdesi |
|----------|-----------------|---------------|
| 1        | Giriş Hızı, m/s | 70,16         |
| 2        | Solvent         | 11,13         |
| 3        | Lüle Çapı, mm   | 10,57         |

Enjektör gövdesi yakıt deliği temizleme performansına etki eden parametrelerin optimal seviye kombinasyonunun belirlenmesinde, giriş parametrelerinin etki yüzdeleri Çizelge 4.3'te paylaşılmıştır.

**Çizelge 4.5.** Enjektör gövdesi yakıt deliği temizleme performansına etki eden parametrelerin optimal seviye kombinasyonu

| <b>Parametreler</b> | <b>Optimal Seviyeler</b> |
|---------------------|--------------------------|
| Solvent             | Solvent1                 |
| Lüle Çapı, mm       | 4,0                      |
| Giriş Hızı, m/s     | 0,5                      |

Gerçekleştirilen analizlerde basınç değerleri düşük değerlerde çıkmıştır. Oluşturulan tabloda 2 m/s'lik hızlarda elde edilen basınç değerleri 59 kPa-153 kPa'dır. Analizlerden elde edilen değerler elde edilen değer aralıkları yakıt deliği geometrisine aşındırıcı bir etkisi olmamakla beraberinde düşük seviyelerdedir. 1 m/s'lik hızlarda oluşan delik içi basınçlar 26 kPa-64 kPa aralığında değişmektedir.

Analizlerde öncelik süre ve temizleme kriteri olduğundan solventin delik içerisinde giriş çıkış sıcaklık farkları göz ardı edilmiştir. Giriş sıcaklığı 25 C° olan solventin ortalama çıkış sıcaklığı 28 C° olarak belirlenmiştir. Analizlerde elde edilen sonuçlarda delik içi temizleme süresinin ortalama 2 saniye süre olduğundan ve bu süre zarfında sıcaklık değişimi lüle çıkışı ve enjektör girişi bölgelerinde oluşmaktadır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, bir enjektör gövdesindeki yakıt deliğinin tamamının solvent ile temas edecek şekilde akış oluşturulmasının ardından hava jeti uygulaması ile solventin delik içerisinden uzaklaştırma oranları üzerine Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri yardımıyla sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada literatürde benzer sorun ve çözümleri araştırılmıştır. Çalışılan sistem üzerinde sayısal olarak inceleme yapılmış, gerçek akış durumları simülasyonu oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiş olup ilk aşamada 3 Parametre ve 3 seviyeli Taguchi deney tasarımından yararlanılarak 9 ayrı lüle/nozul modeli ile birlikte akış hacimleri CAD ortamında tasarlanmış ve analizler için hazır hale getirilmiştir. Lülelerde değişken parametreler çap ölçüsü olup uzunluk sabit tutulmuştur. Diğer değişkenler delik içerisine uygulanan solventlerin termofiziksel özellikleri ve son olarak giriş debileri olmuştur. Oluşturulan modeller üzerinden ANSYS Fluent programıyla nümerik analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde AFM prosesi sonrasında enjektör yakıt deliği içerisindeki kalabilecek partiküllerin temizlenebilmesi için optimum tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- 1- iki aşamalı analizler Gerçekleştirilmiş olup Solvent ile uygulanan ilk aşama analizlerinde akışkan parametrelerine en çok etki eden parametrenin %70,16 oranla akışkan giriş hızı (akışkan debisi) olduğu belirlenmiştir.
- 2- Tasarlanan lüle modellerinde lüle geometrisinin etki oranları birbirine yakın olduğu görülmekte olup en az etkiyi göstermiştir.
- 3- 1'inci aşama HAD analizlerinde temizlik süresinin ortalama süresi 2 s olarak belirlenmiştir. Burada lüle çaplarının yakın değerler olması büyük etken olarak görülmektedir.
- 4- Tüm analizlerde yakıt deliği içerisine solventin %99 oranında dolduğunu ve delik içerisinden ilerlediği görülmüştür. delik birleşim noktalarının tamamında solvent etkili olarak yüzeye temas etmektedir.
- 5- Tüm analizlerde lüle ve enjektör deliği temas noktalarında hava kabarcıkları olduğu görülmüştür. Delik temizleme süresi uzatılsa da kabarcıkların

giderilmediği analizlerde belirlenmiştir. Yapılan analizlerde geometri ölçüleri çok küçük olduğundan bu durum ihmal edilebilir durumdur.

- 6- İkinci aşamada en solvent ile temizleme yapılan delik tamamen solvent ile dolduğu belirlenmiş ve hava jeti uygulamasıyla solventin delik içerisinden uzaklaştırılabileceği belirlenmiştir.
- 7- Hava ile uygulanan analizlerde delik içerisinde oluşan çift fazlı akışın fazlar arasındaki yoğunluk farkı nedeniyle daha agresif olduğu görülmüştür.
- 8- Hava ile uygulanan analizde ilk aşamada olduğu gibi lüle ve enjektör deliği temas noktalarında baloncuklar oluştuğu görülmüştür. Havanın aksine sıkıştırılmaz akışkanlar bu bölgelerde işlem sonrası iz ve partikül kalmasına neden olabilir.
- 9- iki şamalı analiz sonrası lüle çapı 4mm, akışkan giriş hızı 0,5 m/s olan ve solventli çözücüsü optimal şekilde enjektör deliğini temizleyeceği sonucuna ulaşılmıştır.
- 10- Giriş hızının 0,5 m/s olarak bulunması, kullanılacak hidrolik pompanın özelliklerini de belirlemeye yardımcı olacaktır. Diğer hızlarla kıyaslandığından seçilecek hidrolik motor minimum enerji sarfiyatıyla görev yapabilecektir.
- 11- iki aşamada gerçekteştirilen analizlerde toplam temizlik süresinin 5 saniyeyi geçmeyeceği belirlenmiştir. TÜBİTAK-1505 kapsamında tasarlanan makinede elde edilen veriler kullanılacak olup proses süresi en aza indirilmede yardımcı olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Qu, J., Yan, T., Sun, X., 2019. Numerical simulation of the effects of the helical angle on the decaying swirl flow of the hole cleaning device, *Processes*, Vol.7 , Article Number: 109.
- Dong, Z., Hao, F., Kwon, P., 2016. Simulation analysis of negative-pressure chip removing device of deep-hole processing based on FLUENT software, *AER-Advances in Engineering Research*, Vol.79 ,pp. 14-16.
- Yeu, W.J., Katende, A., Sagala, F., 2019, Improving hole cleaning using low density polyethylene beads at different mud circulation rates in different hole angles, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol.61 , pp.333-343 .
- Khatibi, M., Time, R.W., Shaibu, R., 2018, Dynamical feature of particle dunes in Newtonian and shear-thinning flows: Relevance to hole-cleaning in pipe and annulus, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.99 ,pp. 284-293.
- Akhshik, S., Behzad, M., Rajabi, M., 2015, CFD-DEM Model for simulation of non-spherical particles in hole cleaning process, *Particulate Science and Technology*, Vol. 33,pp. 472-481.
- Helbig, M., Zahn, S., Boettcher, K., 2019, Laboratory methods to predict the cleaning behaviour of egg yolk layers in a flow channel, *Food and Bioproducts Processing*, Vol.113 ,pp.108-117 .
- Jarvis, J.M., Hall, M.I., Babel, P.J., 2017, Advantages of air blow cleaning of steam pipes for cost and schedule savings, *Proceedings of The ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Vol. 3B, Article Number: UNSP V03BT03A038.
- Joppa, M., Köhler, H., Rüdiger, F., 2017, Prediction of cleaning by means of computational fluid dynamics: implication of the pre-wetting of a swellable soil, *Proc. Int. Conf. Heat Exch. Fouling Clean.*,pp. 248–255.
- Stepuk, P.J., Diakun, J., Mierzejewska, S., 2016, Poly-optimization of cleaning conditions for pipe systems and plate heat exchangers contaminated with hot milk using the Cleaning In Place method, *Journal of Cleaner Production*, Vol.112 , pp. 946-952.
- Shepley, P., Bolton, M.D., 2014, Using water injection to remove pile base resistance during installation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.51 , pp. 1273-1283.
- Auernhammer, G.K., Collin, D., Martinoty, P., 2006, Viscoelasticity of suspensions of magnetic particles in a polymer: Effect of confinement and external field, *Journal of Chemical Physics*, Vol.124 , Article Number: 204907.
- Singh, S., Shan, H.S., Kumar, P., 2008, Experimental studies on mechanism of material removal in abrasive flow machining process, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.23 , pp.714-718.

- Uhlmann, E., Doits, M., Schmiedel, C., 2013, Development of a material model for visco-elastic abrasive medium in Abrasive Flow Machining, *Procedia CIRP*, Vol.8 ,pp. 351-356.
- Lu, H.C., Tsai, C.J., 2003, Influence of different cleaning conditions on cleaning performance of pilot-scale pulse-jet baghouse, *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, Vol.129 , pp. 811-818.
- Leubner, H., Riebel, U., 2004, Pulse jet cleaning of textile and rigid filter media characteristic parameters, *Chemical Engineering & Technology*, Vol.27 , pp. 652-661.
- Yan, C., Liu, G., Chen, H., 2013, Effect of induced airflow on the surface static pressure of pleated fabric filter cartridges during pulse jet cleaning, *Powder Technology*, Vol. 249, pp. 424-430.
- Cai, J., Hao, W., Zhang, C., 2017, On the forming mechanism of the cleaning airflow of pulse-jet fabric filters, *Journal of The Air & Waste Management Association*, Vol.67 , pp.1273-1287 .
- Li, S., Zhou, F., Xie, B., 2018, Influence of injection pipe characteristics on pulse-jet cleaning uniformity in a pleated cartridge filter, *Powder Technology*, Vol.328 , pp.264-274.
- Li, J., Wu, D., Wu, Q., 2019, Design and performance evaluation of novel colliding pulse jet for dust filter cleaning, *Separation and Purification Technology*, Vol.213 , pp. 101-113.
- Dos Santos, L.G.P., Sartim, R., Rocha, S.M.S., 2020, Flow distribution and jet behavior analysis of fabric filter's pulse-jet cleaning, *Journal of The Air & Waste Management Association*, Vol.70 ,pp. 544-556.
- Wu, Q., Li, J., Wu, D., 2020, Effects of the overall length and OD on opposing-pulse-jet cleaning for pleated filter cartridges, *Aerosol and Air Quality Research*, Vol.20 , pp. 432-443.
- Cheng, C.C., Tsai, S.M., Cheng, H.P., 2014, Analysis for heat transfer enhancement of helical and electrical heating tube heat exchangers in vacuum freeze-drying plant, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.58 , pp.111-117 .
- Cunill, F., vandeBeld, L., Westerterp, K.R., 1997, Catalytic combustion of very lean mixtures in a reverse flow reactor using an internal electrical heater, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.36 , pp.4198-4206 .
- Golebiowski, J., Peterson, W., 1996, Stationary thermal field in a long duct of an electrical heating system, *Electrical Engineering*, Vol.79 , pp. 17-21.



Krol, M.M., Sleep, B.E., Johnson, R.L., 2011, Impact of low-temperature electrical resistance heating on subsurface flow and transport, *Water Resources Research*, Vol. 47, pp. 1-12.

Korolev, A.V., 2001, Effect of ac electric heating on hydraulic resistance of channels, *Atomic Energy*, Vol.91 , pp. 774-776.

Liu, K., Huang, S., Xie, H., 2017, Multi-objective optimization of the design and operation for snow-melting pavement with electric heating pipes, *Applied Thermal Engineering*, Vol.122 , pp.359-367 .

Su, J., Cerqueira, D.R., Estefen, S.F., 2005, Simulation of transient heat transfer of sandwich pipes with active electrical heating, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of The ASME*, Vol.127 , pp. 366-370.

Tanaka, K., Harada, R., Uemura, T., 2010, Rapid pipe moulding process of Carbon Fibre Reinforced Thermoplastics by high-frequency direct resistance heating, *WIT Transactions on the Built Environment*, Vol.112 , pp. .133-139.

Wang, G., Hui, Y., Zhang, L., 2018, Research on temperature and pressure responses in the rapid mold heating and cooling method based on annular cooling channels and electric heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.116 , pp.1192-1203.

Hsiao, F., Lim, Y., Huang, J., 2010, On the near-field flow structure and mode behaviors for the right-angle and sharp-edged orifice plane jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.34, pp. 1282-1289.

Bordoloi, A., Longmire, E., 2018, Local velocity variations for a drop moving through an orifice: effects of edge geometry and surface wettability, *Phys. Rev. Fluids* Vol. 3, pp. 12.

Benhamadouche, S., Arenalar, M., Malouf, WJ., 2018, Wall-resolved Large Eddy Simulation of a flow through a square-edged orifice in a round pipe at  $Re = 25,000$ , *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 312, pp. 128-136.

Zhang, B., Qiao, Y., Khiabani, N., Wang, X., 2022, Study on rheological behaviors of media and material removal mechanism for abrasive flow machining (AFM) micro structures and corresponding simulations, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 73, pp. 248-259.

Jain, V., Adsul, S., 2000, Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, pp. 1003-2021.

Loveless, T., Williams, R., Rajurkar, K., 1994, A study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 47, pp. 133-151

Rhoades, L., 1991, Abrasive flow machining: a case study, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 28, pp. 107-116.

Walia, R., Shan, H., Kumar P., 2006 Abrasive flow machining with additional centrifugal force applied to the media, *Mach. Sci. Technol.*, Vol. 3, pp. 341-354

Sing, S., Kumar, H., Kumar S., Chaitanya, S., 2022 A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM), *Materialstoday: Proceedings.*, Vol. 56, pp. 3108-3116

Zhang, B., Chen, S, Wang, X., 2022, Machining uniformity and property change of abrasive media for micro-porous structures, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 307, 117675

Butola, R., Jain, R., Bhangadia, P., Bandhu, A., Walia, R.S., Mutaza Q., (2018). Optimization to the parameters of abrasive flow machining by Taguchi method, *Materialstoday: Proceedings*, Vol. 5, pp. 4720-4729

Wei, H., Peng, C., Gao A., Wang, X., (2019). On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasive flow machining, *Materialstoday: Proceedin International Journal of Machine Tools and Manufacture.*, Vol. 138, pp. 67-79.

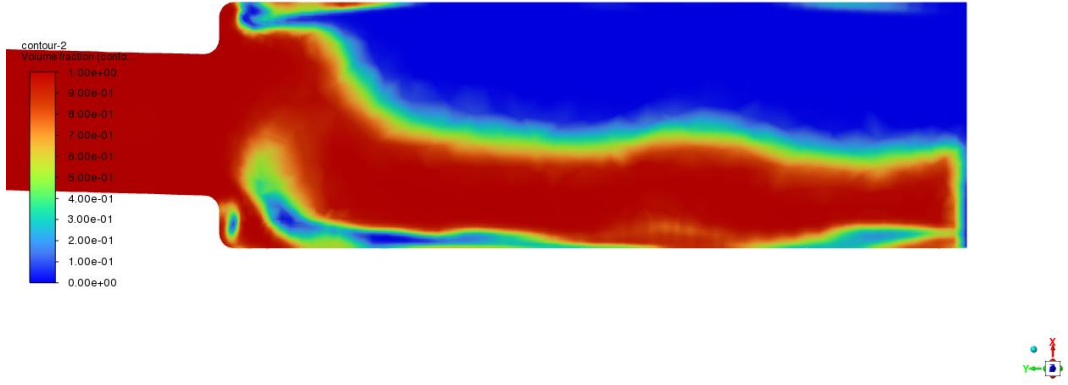
Saha, A., Mitra, S.K., (2009). Effect of dynamic contact angle in a volume of fluid (VOF) model for a microfluidic capillary flow, *Journal of Colloid and Interface Science.*, Vol. 339, pp. 461-480.

Erdöl, E., (2007). Enjektör parametrelerinin motor egzoz emisyonlarına etkisi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Tesi / Fen Bilimleri Enstitüsü*

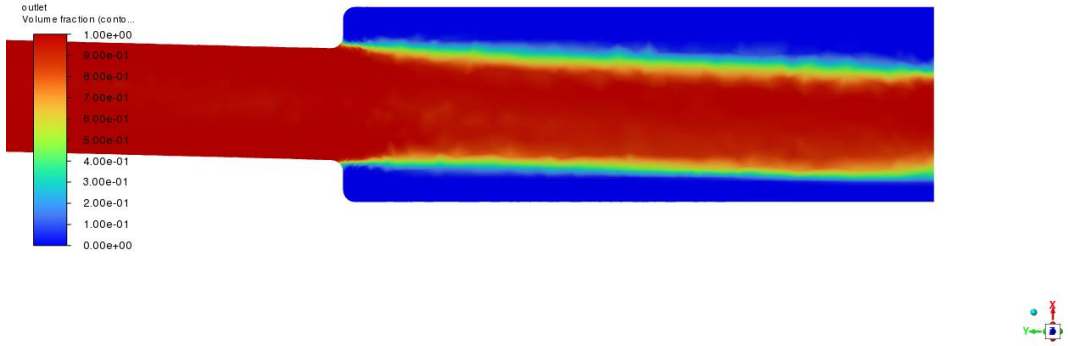
Agrawal, A., Jain, V.K., Muralidhar, K., (2005). Experimental determination of viscosity of abrasive flow machining media, *Manufacturing Technology and Management*, Vol. 7, Nos. 2/3/4

Başyazıcı, İ.U., (2007). İki Fazlı Akışlara Sayısal Yöntemlerin Uygulanması, *YILDIZ Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.

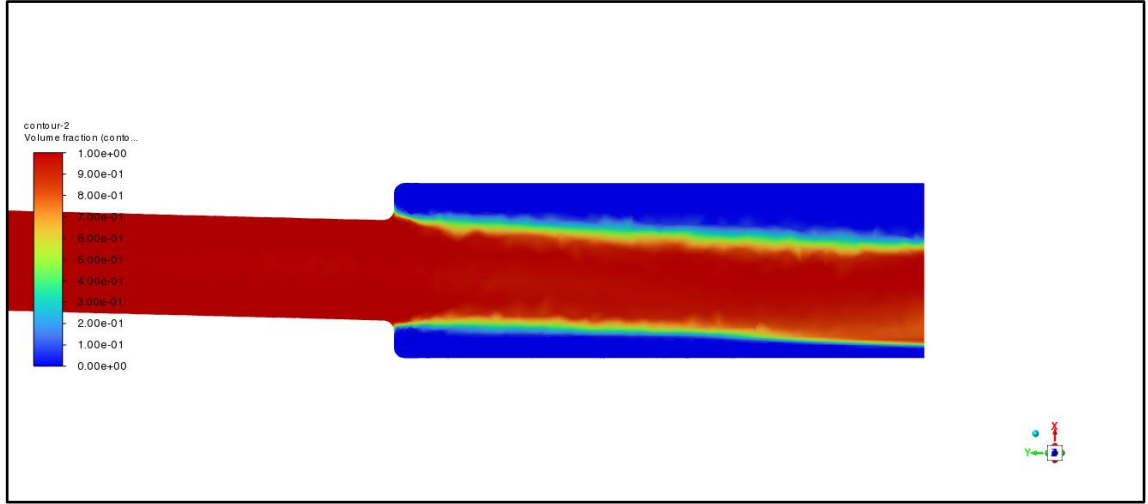
## EKLER



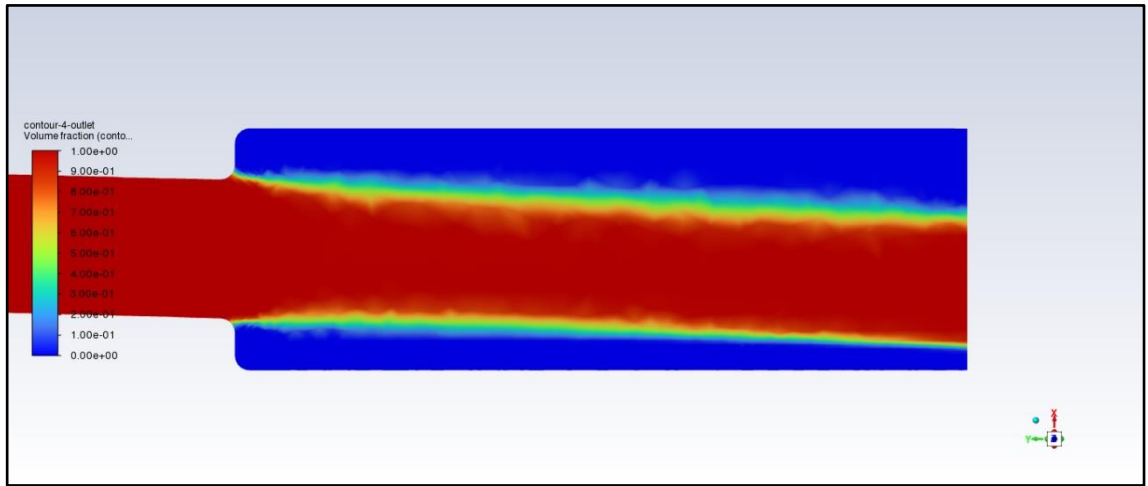
Ek Şekil 1.1 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış karakteristiği



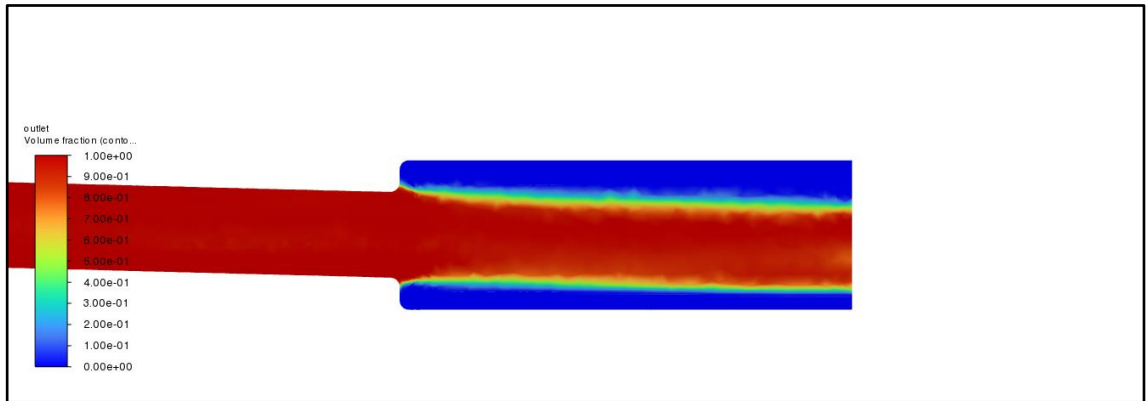
Ek Şekil 2.2 nolu seviye kombinasyonuna ait çıkış deliği akış karakteristiği



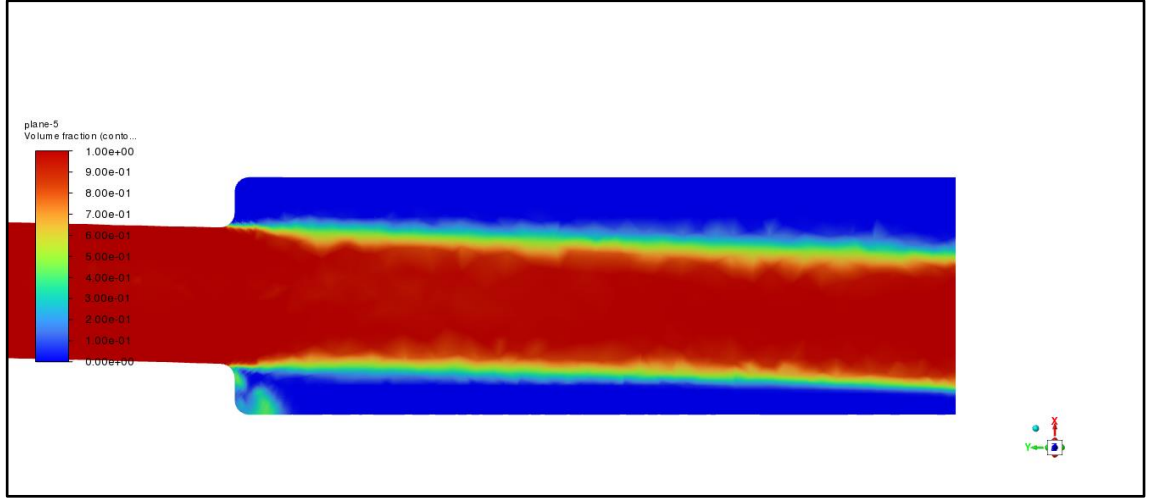
**Ek Şekil 3.** 3 nolu seviye kombinasyonuna ait lüle tasarımı ve karakteristik büyüklükler



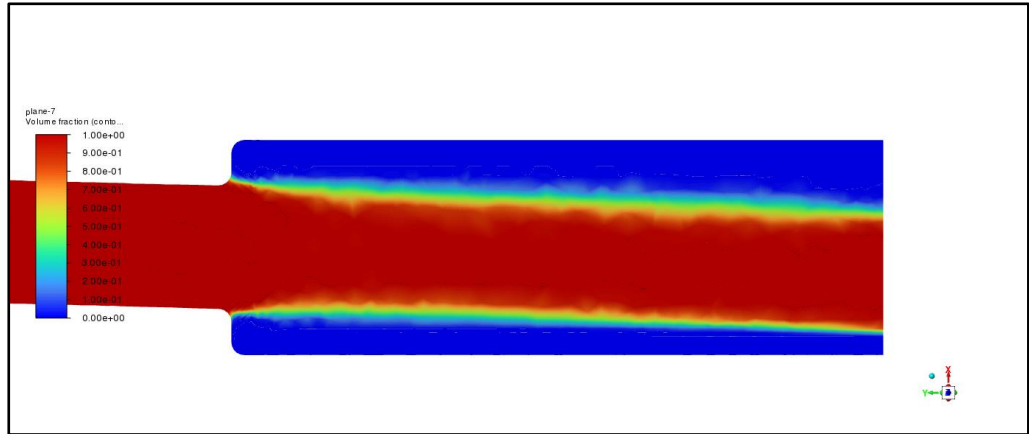
**Ek Şekil 4.** 4 nolu seviye kombinasyonuna ait lüle tasarımı ve karakteristik büyüklükler



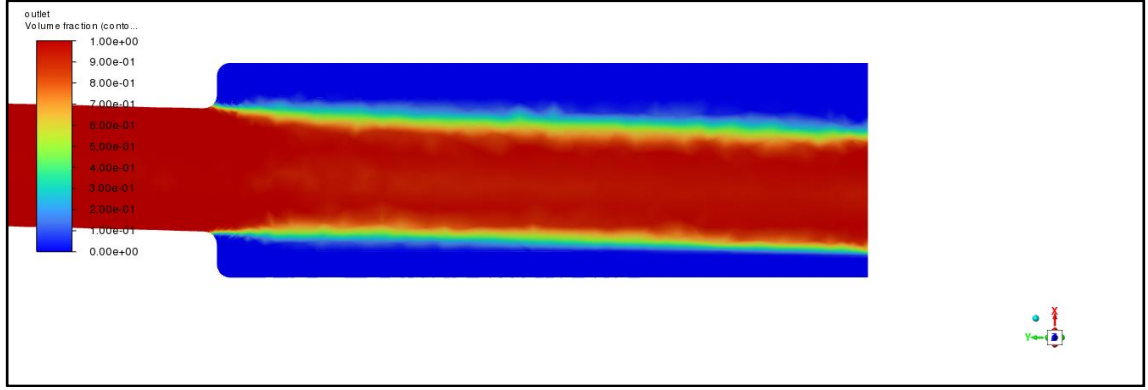
**Ek Şekil 5.** 5 nolu seviye kombinasyonuna ait lüle tasarımı ve karakteristik büyüklükler



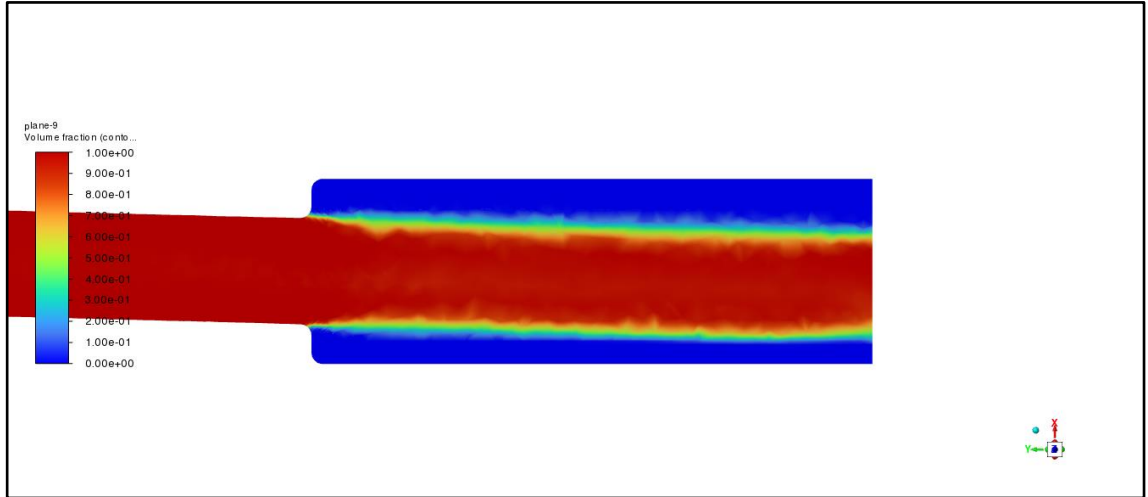
**Ek Şekil 6.** 6 nolu seviye kombinasyonuna ait lüle tasarımı ve karakteristik büyüklükler



**Ek Şekil 7.** 7 nolu seviye kombinasyonuna ait lüle tasarımı ve karakteristik büyüklükler



**Ek Şekil 8.** 8 nolu seviye kombinasyonuna ait lüle tasarımı ve karakteristik büyüklükler



**Ek Şekil 9.** 9 nolu seviye kombinasyonuna ait lüle tasarımı ve karakteristik büyüklükler

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İbrahim ALTIN  
Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA, 08.06.1989  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Ali Osman Sönmez EML, 2003 – 2006

Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü, 2014 – 2020

Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Termodinamik Bilim  
Dalı, 2020- *Devam Ediyor*

Çalıştığı Kurum(lar) : Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Tic. A.Ş. Ar-  
Ge Merkezi, 2020 – *Devam Ediyor*

İletişim (e-posta) : ibrahimaltin89@gmail.com

Akademik çalışmalar\* : Büyükbayraktar, A., KINAGU, H. M., ALTIN, İ.,  
ÖZALP, A., Elif, Ö. Ğ. Ü. T., SALİHOĞLU, N. K., ... & MUTAF, G. U. (2022). Dizel  
Enjektör Yakıt Deliğinin Aşındırıcı Akış ile İşlenmesi (AFM) Sonrası Kalıntı  
Macundan Temizlenmesine Yönelik Makinenin Geliştirilmesinde Kullanılacak  
Kompakt Isı Eşanjörü Tasarım Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (36), 243-  
254.