5th International Congress of Engineering and Natural Sciences

ISBN: 978-625-372-661-4

Investigation of the Effect of Injector Geometry on Hydrogen Spray Characteristics by Numerical Simulation Method

Şerefcan DURANLI[1]
Orkun ÖZENER[2]

Abstract

In the ongoing global effort to find viable alternatives to fossil fuels, hydrogen stands out as a promising option due to its potential for zero carbon emissions. Nevertheless, hydrogen's unique physical characteristics result in notable deviations in in-cylinder injection dynamics and mixture formation compared to traditional fuels. This study explores how variations in injector tip geometry affect the spray behavior of hydrogen injected into a cylindrical chamber, operating under constant injection pressure and a time-dependent mass flow rate. The research is conducted without accounting for combustion processes and focuses on key spray metrics such as jet penetration length, spray cone angle, and the spatial distribution of hydrogen within the domain. Numerical simulations were carried out using CONVERGE CFD software, and the resulting flow fields and scalar distributions were post-processed with Tecplot 360 EX. The results demonstrate that injector tip design has a substantial influence on spray development. Specific geometric features, including tip caps, poppet valves, pintle protrusion, and tip curvature, significantly affect spray patterns and mixture uniformity under varying pressure conditions. These insights offer valuable guidance for the design and optimization of hydrogen injectors and spray strategies in hydrogen-fueled internal combustion engines.

This work has been supported by Yıldız Technical University Scientific Research Projects Coordination Unit under project number FYL-2024-6336.

Keywords: Hydrogen, injector geometry, spray characteristics, simulation

[1] Makine Mühendisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği YL, serefcan.duranli@std.yildiz.edu.tr, Orcıd: 0009-0001-0881-4813
[2] Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, oozener@yildiz.edu.tr, Orcıd: 0000-0001-9168-5161

ISBN: 978-625-372-661-4

GİRİŞ

Fosil yakıt rezervlerinin azalması ve uluslararası çevre regülasyonlarının sıkılaşması, ulaşım sektöründe sürdürülebilir ve çevre dostu alternatif enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda hidrojen, sıfır karbon salımı potansiyeli, yüksek özgül enerji içeriği ve geniş tutuşma limitleri gibi üstün termofiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde içten yanmalı motorlar için ideal bir alternatif yakıt olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, hidrojenin düşük enerji yoğunluğu, düşük yoğunluğu ve yüksek laminer alev hızı gibi özellikleri, özellikle doğrudan enjeksiyon sistemlerinde önemli tasarımsal ve işletimsel zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle hidrojenin etkin kullanımı, enjektör nozulu geometrisi, enjeksiyon parametreleri ve motor tasarımının hassas bir şekilde optimize edilmesini gerektirmektedir.

Literatürde gerçekleştirilen çok sayıda araştırmada hidrojen jetlerinin sprey penetrasyonu, şok oluşumu, karışım dağılımı ve enjeksiyon sonrası türbülans davranışları gibi kritik parametrelerin incelenmesine yoğunlaşılmıştır. Yapılan çalışmalar, nozulların açısal pozisyonu, delik geometrisi, sayısı, nozulun montaj şekli ve piston tasarımı gibi farklı geometrik ve operasyonel parametrelerin sprey penetrasyon derinliği, jet açısı ve türbülans yoğunluğu üzerinde belirgin etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek basınçlı enjeksiyon sistemlerinde, jetin penetrasyon derinliğinin artırılması ve homojen bir karışım sağlanması için enjektör nozullarının geometrik tasarımının kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır. Bu bağlamda nozulların yüzeye gömülü ya da belli bir mesafede geri çekilmiş olması gibi konfigürasyonların jet penetrasyonuna ve türbülans oluşumuna doğrudan etki ettiği belirtilmektedir.

Bunun yanı sıra, hidrojen jetlerinin nozul çıkışında oluşan Mach diskleri ve şok dalgaları, karışımın homojenliğini olumsuz yönde etkileyebilecek faktörler olarak gösterilmektedir. Bu durumun özellikle yüksek enjeksiyon basınçlarında ve düşük oda basıncı oranlarında belirginleştiği ve karışım kalitesini olumsuz etkileyebileceği ifade edilmektedir. Ancak son dönemlerde yapılan yenilikçi tasarımlar, örneğin çok delikli nozullar ve Coanda etkisi gibi yaklaşımlar sayesinde hidrojenin hava ile daha iyi karışması sağlanarak bu olumsuzlukların önüne geçilmesi mümkün hale gelmiştir.

Bu çalışma kapsamında, enjektör uç geometrisinin hidrojen sprey karakteristikleri üzerindeki etkisi, sabit enjeksiyon basıncı altında zamana bağlı değişen kütlesel debi koşullarında gerçekleştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonlarıyla detaylı biçimde incelenmiştir. Silindirik bir ortamda gerçekleştirilen analizlerde yanma reaksiyonları ihmal edilerek, farklı enjektör ucu geometrilerinin jet penetrasyon uzunluğu, sprey yayılım açısı ve yakıt dağılımı gibi parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı geometrik varyasyonların karışım homojenliği üzerindeki etkileri analiz edilerek, tasarım parametrelerinin motor performansı açısından önemi vurgulanmıştır. Sonuçlar, enjektör ucunda kep kullanımı, poppet valf kullanımı, çıkıntılar ve yuvarlatmalar (radyus) gibi geometrik değişikliklerin sprey penetrasyonu ve karışım kalitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu bulgular, hidrojen enjeksiyon sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için değerli bilgiler sağlamakta, motor performansının artırılması ve emisyonların azaltılması açısından önemli katkılar sunmaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada uygulanan yöntem, doğrudan enjeksiyonlu hidrojen motorlarındaki jet penetrasyonu davranışını ve sprey karakteristiklerini belirlemek amacıyla geliştirilen sayısal modelleme yaklaşımına dayanmaktadır. Literatürde özellikle Kamimoto ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, hidrojen jetlerinin penetrasyon uzunluğunun enjeksiyon basıncı ve ortam basıncı oranına kuvvetle bağlı olduğu ortaya konmuş ve kritik basınç oranının aşılması durumunda nozuldaki akışın boğulduğu ve jet penetrasyonunun belirli bir seviyede sabitlendiği deneysel olarak doğrulanmıştır. Benzer bulgular Akar ve Özener'in gerçekleştirdiği sayısal çalışmalarda da görülmüş olup, motor içi gaz hareketlerinin ve karışım homojenliğinin jet penetrasyonunu önemli ölçüde etkilediği ortaya konmuştur.

Bu doğrultuda, mevcut çalışmada Kamimoto'nun deneyleri esas alınarak, benzer basınç ve enjeksiyon koşullarında hidrojen jet penetrasyon davranışı sayısal simülasyonlarla yeniden üretilmiştir. Bu simülasyonların güvenilirliğini sağlamak için ilk olarak Kamimoto'nun kritik basınç oranları ve penetrasyon ölçümleri temel alınarak, oluşturulan CFD modelinin validasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu adımda, Akar ve Özener'in çalışmalarında da izlenen yöntemle benzer şekilde üç boyutlu simülasyon ortamı hazırlanmış, hidrojen gazının fiziksel ve termodinamik özelliklerini doğru temsil edecek uygun türbülans ve gaz modelleri seçilmiştir. Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle uyumu değerlendirildikten sonra, doğrulanan bu model üzerinden farklı geometrik parametrelerin jet davranışına etkileri detaylıca incelenmiştir.

Kamimoto deneyleri 1-2-3-4 ms sürelerinde jet penetrasyonu parametresi üzerinden Kamimoto makalesinde verilen kritik basınç oranı (Pc=1.89) gözetilerek makalede ele alınan 1.3Pc, 1.0Pc, 0.7Pc ve 0.4Pc sınır şartları için simüle edilmiştir.

***Tablo 15**: Simülasyonların 1ms'deki karşılaştırmalı sonuçları*

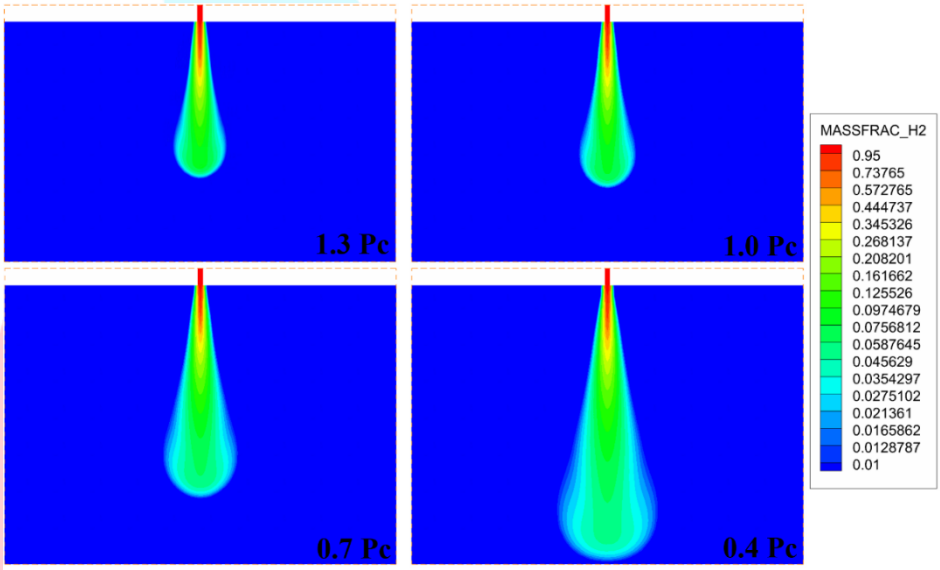
Geri Basınç Oranı	**Kamimoto Deneyleri**	**Analiz Sonuçları**
0.4Pc	~50mm	49.45mm
0.7Pc	~39mm	38.15mm
1.0Pc	~30mm	29.81mm
1.3Pc	~28mm	28.11mm

Özellikle bu çalışmada ele alınan enjektör nozulu geometrileri, Kamimoto'nun çalışmasında kullanılan standart silindirik nozullardan farklıdır. Bu farklılık, hidrojen jetinin penetrasyon ve karışım davranışlarını geliştirmek amacıyla belirlenmiş olup, özellikle nozula eklenen çıkıntı, kep ve yuvarlatma gibi geometrik modifikasyonlarla zenginleştirilmiştir. Bu yenilikçi geometri seçimleri, jetin karakteristik özelliklerindeki değişime nozul ağzının etkisini göz önüne koymak adına kritik rol oynamaktadır. Enjektör lokasyonu Kamimoto deneylerindeki gibi yanal yüzeyde değil silindirin üst yüzeyinde olacak şekilde motor benzeri geometri sağlamak adına tasarlanmıştır. Bu aşamada, Kamimoto'nun deneylerinde elde edilen temel jet penetrasyon verilerinin sayısal olarak doğrulanması, simülasyon modelinin fiziksel geçerliliğini ortaya koymuş ve farklı enjektör geometrilerinin penetrasyon üzerindeki etkilerini güvenle karşılaştırmaya imkân sağlamıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, hidrojen yakıtlı motorlarda optimum sprey dağılımını elde etmek için kritik tasarım parametreleri sunmaktadır.

Sayısal simülasyonlarda hidrojen gazının fiziksel özelliklerini hassas bir şekilde temsil edebilmek amacıyla Redlich-Kwong-Soave hal denklemi tercih edilmiş, bu sayede hidrojenin yüksek basınç altı ve üstü koşullardaki gerçek gaz davranışı daha doğru biçimde modellenmiştir. Kritik sıcaklık, basınç ve eksantriklik faktörü gibi parametreler COOLPROP veri tabanından alınarak species-dependent tanımıyla doğrudan modele dahil edilmiş ve

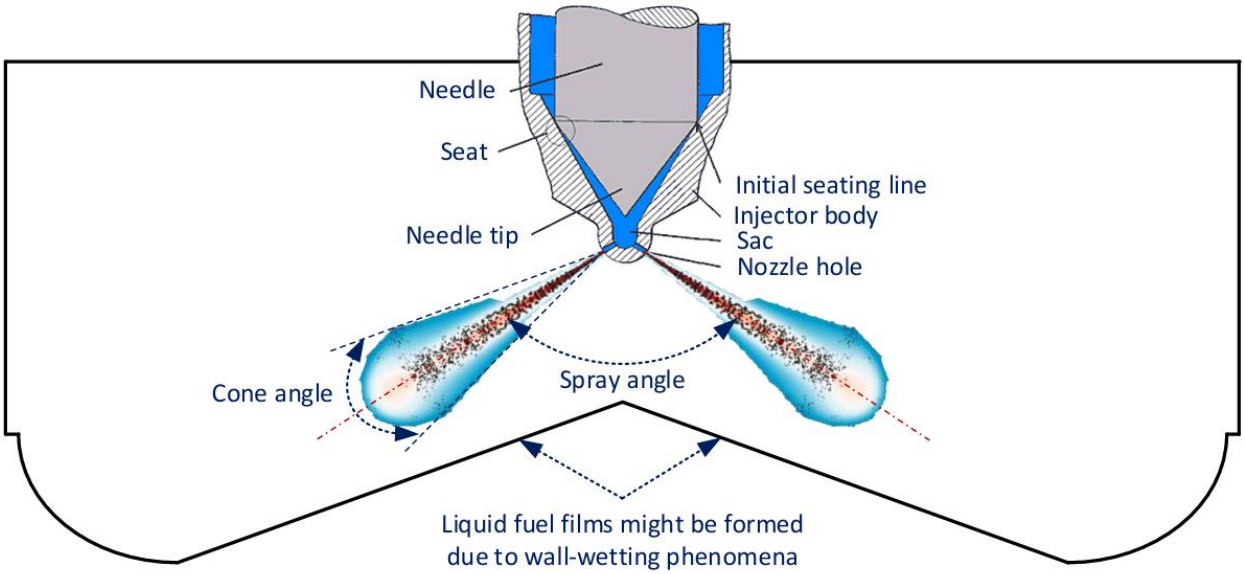
böylece hidrojenin benzersiz fiziksel özellikleri güvenilir biçimde yansıtılmıştır. Karışım içindeki viskozite, ısı iletkenliği ve difüzyon gibi transport özellikleri için karışım ortalamalı (mixture-averaged) yaklaşım benimsenirken, pseudo-critical karışım kuralı kullanılarak çok bileşenli gaz davranışının simülasyonlardaki kararlılığı artırılmıştır.

Türbülanslı akış alanlarının çözümü için Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) yöntemi kullanılmış ve türbülans modellemesinde RNG k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu model, yüksek türbülans gradyanları ve düşük Reynolds sayılarında klasik k-ε modeline kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. Ayrıca, duvar bölgelerinde gelişen karmaşık akış yapılarını daha iyi yakalamak için enhanced wall treatment yöntemi uygulanmıştır. Adaptif mesh rafineleştirme (AMR) yöntemi ile özellikle yüksek hız gradyanlarının ve türbülanslı jet yapılarının oluştuğu bölgelerde çözüm ağı lokal olarak iyileştirilmiş ve böylece çözüm hassasiyeti artırılmıştır. Bu yöntemsel seçimler ve uygulamalar, Kamimoto ve arkadaşlarının deneysel çalışmalarında elde edilen jet penetrasyonu verileriyle başarılı bir şekilde doğrulanmış, gerçekçi ve güvenilir sonuçların alınmasına olanak sağlamıştır.

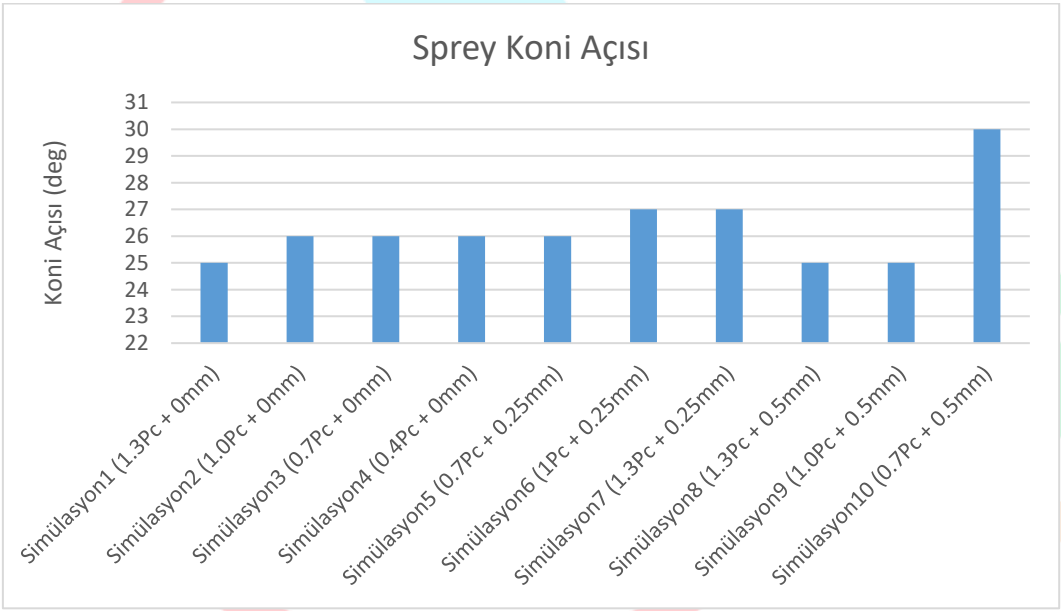


Şekil 1: *Farklı basınç oranlarındaki hidrojen jetinin 1ms anındaki karşılaştırması*

Enjektör geometrisi çeşitli hidrojen sprey özelliklerini gözeterek farklı şekillerde tasarlanmış ve çeşitli sınır şartlarında karşılaştırılmıştır. Bunlardan ilk parametre sprey koni açısıdır. Sprey koni açısı, hidrojen jetinin ortamla etkileşim alanını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Farklı geri basınç ve nozul geometrileri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda, geri basıncın azalmasıyla sprey koni açısının genişlediği ve nozul ucunda yuvarlatma kullanılmasıyla açının belirgin biçimde arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, karışımın daha geniş bir alana yayılması ve türbülans etkisinin artmasına yol açmaktadır.

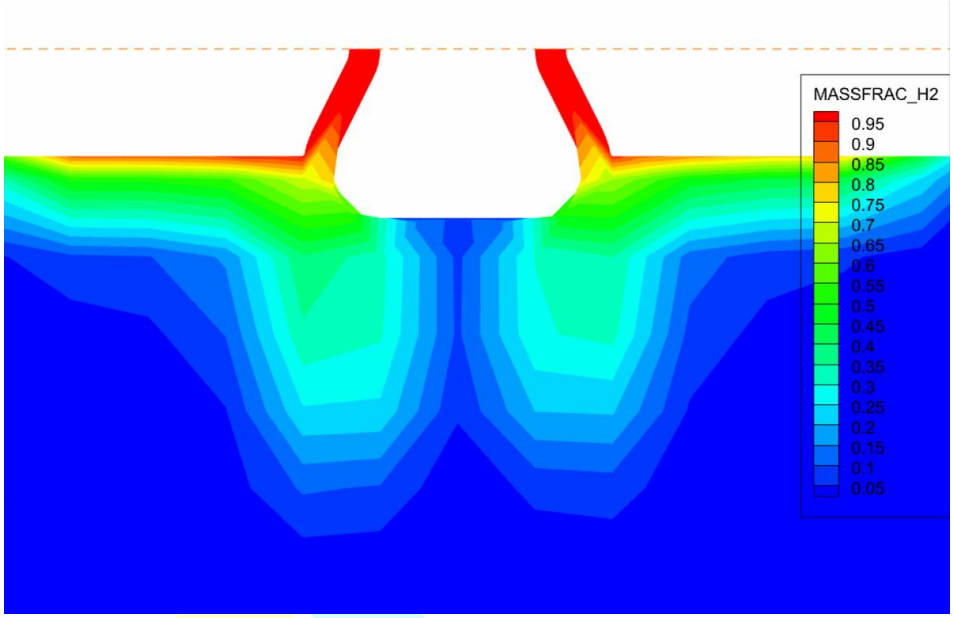


***Şekil 2**: Sprey koni açısı şematik gösterimi (Pham vd., 2022)*

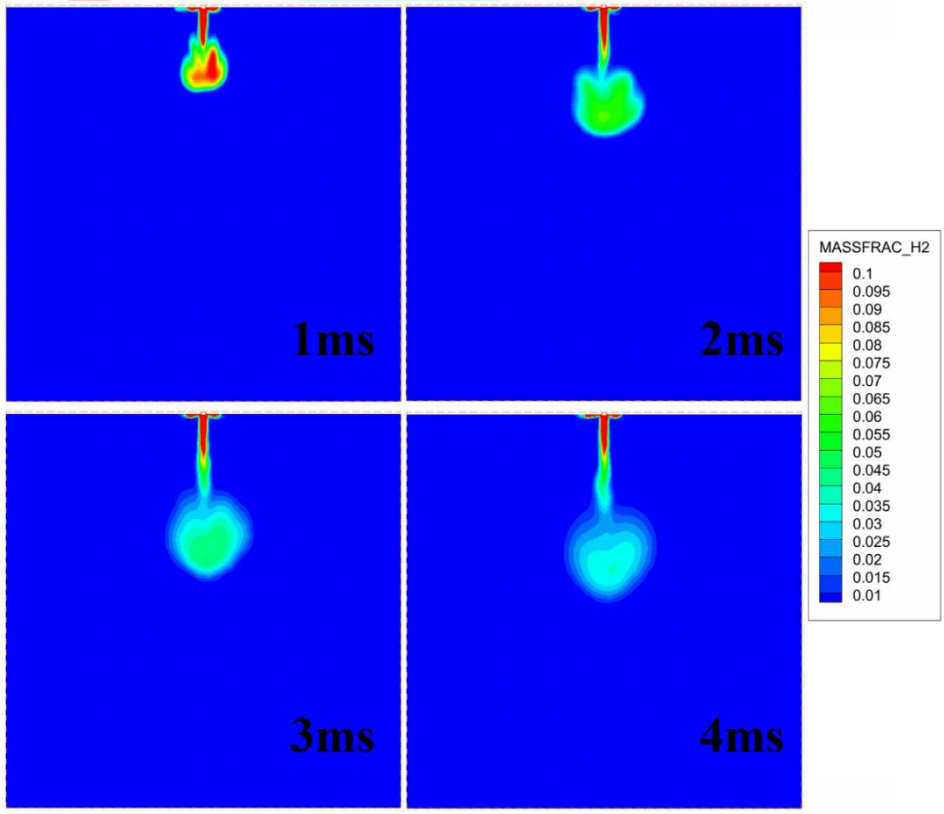


***Şekil 3**: Simülasyonlardaki koni açılarının dağılım grafiği*

Bir diğer incelenen enjektör geometrisi ise iğneli tip enjektör geometrisidir. Enjektörün doğası gereği iğneli enjektör (poppet valf) tipi tasarımların geometri sebepli akışa etkisi göz ardı edilemeyecek seviyededir. İğneli tip enjektör geometrisi kullanımı Coanda etkisini arttırmış, hidrojen jetini konik yayılımdan mantarsı bir görünüme büründürmüştür. Jet penetrasyon boyları marjinal seviyelerde düşmüştür.



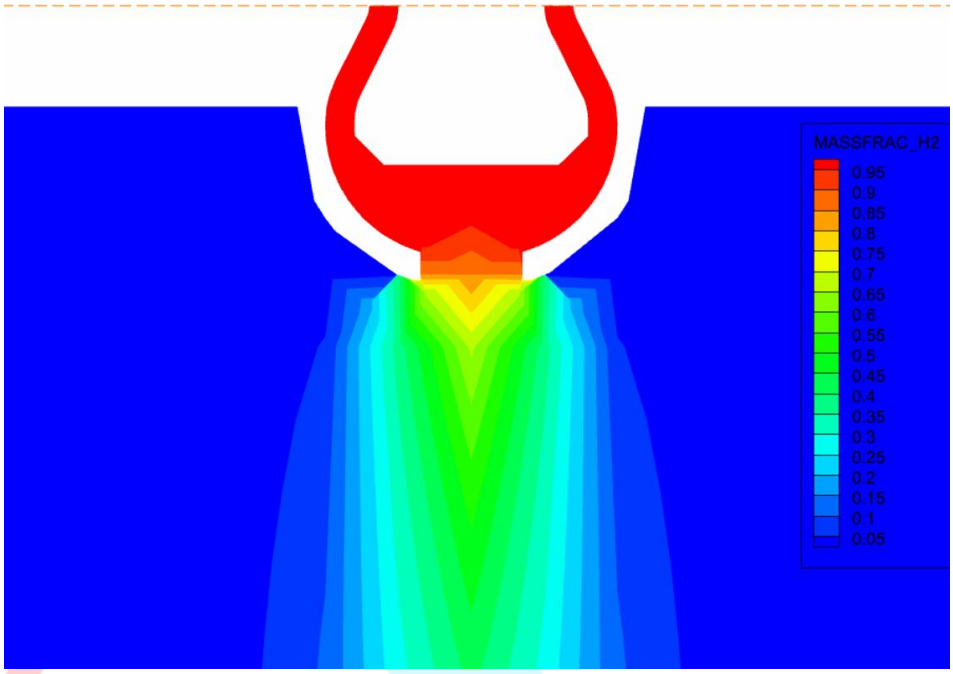
***Şekil 4**: İğneli tip enjektör geometrisinin 1.3Pc basınç oranında enjeksiyon başlangıcındaki 0.1ms görüntüsü*



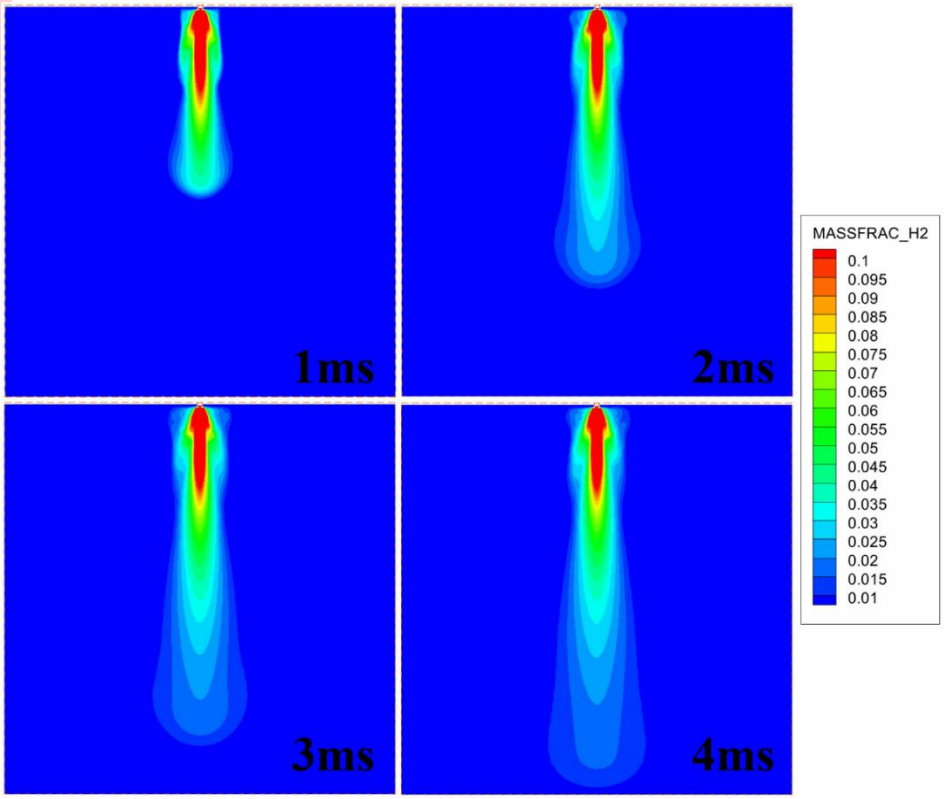
***Şekil 5**: 1.0Pc basınç oranı altında iğneli tip enjektör geometrisinde hidrojen kütle fraksiyonu dağılımının 1 ms, 2 ms, 3 ms ve 4 ms zaman anlarındaki gelişimi.*

Şekil 4'te görülmektedir ki Coanda etkisi sebepli hidrojen jeti yayvanlaşarak, jet penetrasyon boyu marjinal olarak düşmüştür. Önceki simülasyonlarda 4ms anında 70mm'lik silindirik kabın en alt yüzeyine kadar vurarak geri dönen hidrojen spreyi, iğneli geometride ise 35mm jet penetrasyon boyundadır 4ms anında. Bu durum, iğneli tip enjektör geometrisi sonrası hidrojen spreyi düzenleyici bir kep gerekliliğini ortaya koymuştur. Weber ve arkadaşlarının

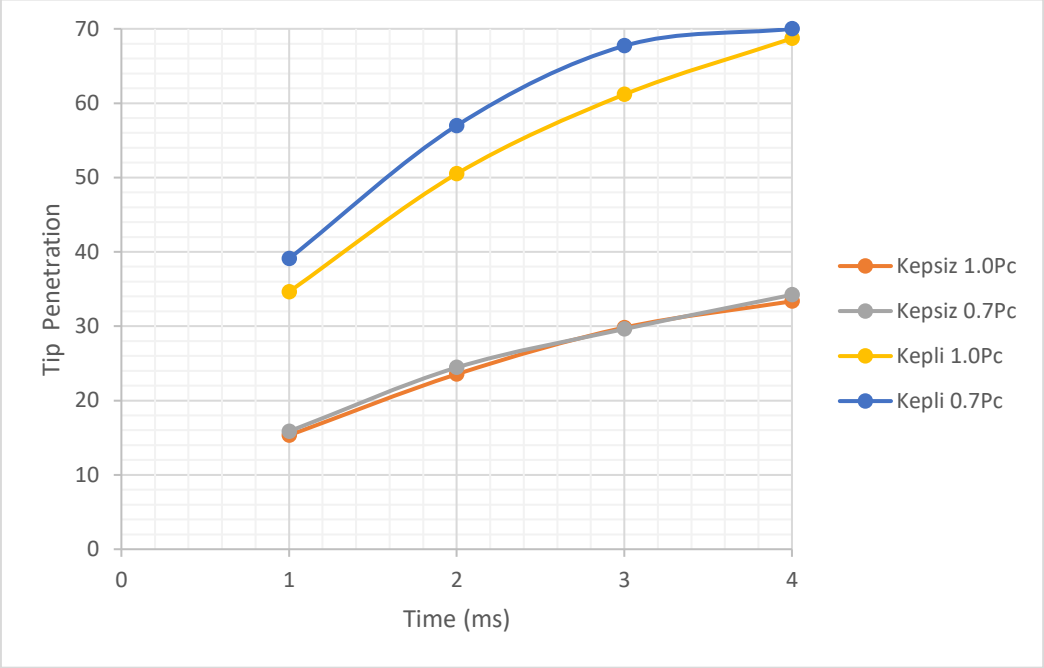
deneysel çalışmalarından esinlenerek tasarlanan kepli enjektör geometrisi simülasyonlara tabi tutulmuştur.



***Şekil 6**: 1.0Pc basınç oranında kepli geometrinin başlangıçta ~0.1ms anındaki simülasyon görüntüsü*

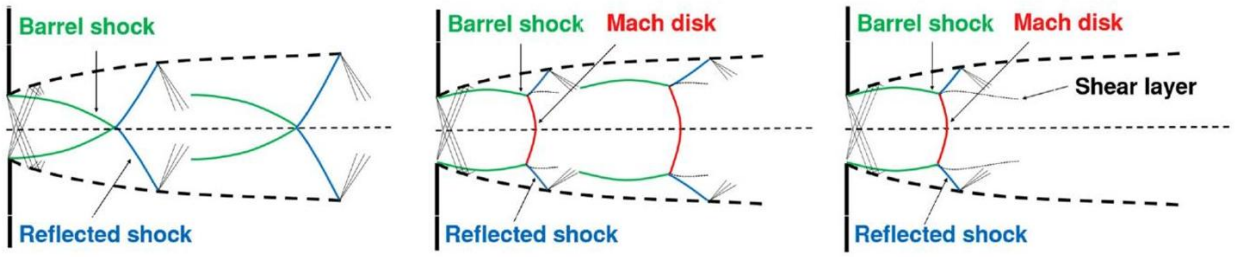


***Şekil 7**: 1.0 Pc basınç oranı altında kep geometrisinde hidrojen kütle fraksiyonu dağılımının 1 ms, 2 ms, 3 ms ve 4 ms zaman anlarındaki gelişimi*



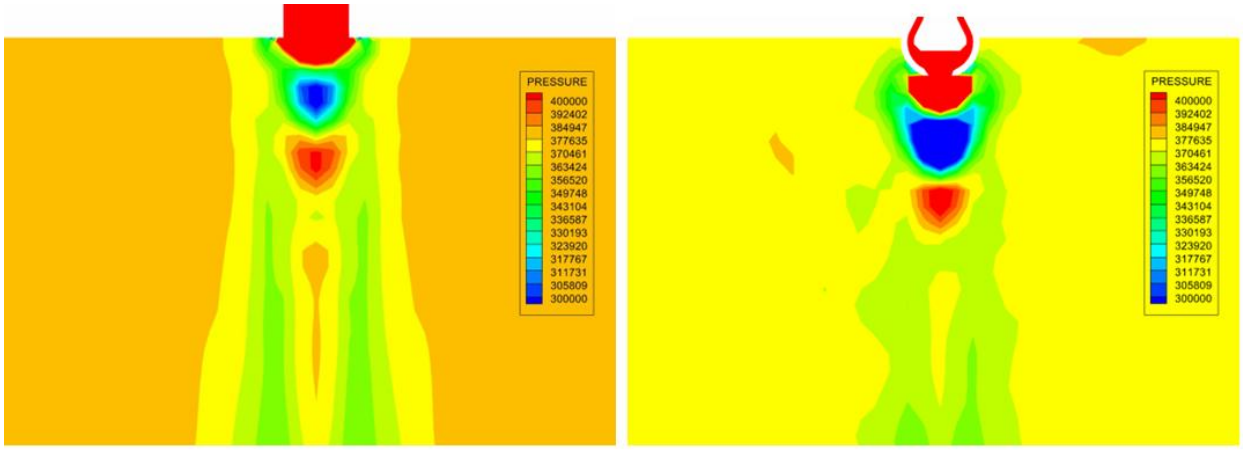
***Şekil 8**: Kepsiz ve kepli geometrilerde jet penetrasyon grafiğinin zamana bağlı gösterimi*

Düşük kritik basınç oranlarında enjektör çıkışında oluşan Mach diskleri ve oblik şok yapılarının hidrojen jetinin gelişimine etkisi incelenmiştir. Bu yapıların underexpanded jet koşullarında oluştuğu Reimer ve arkadaşları tarafından deneylerle ortaya konmuştur. Simülasyonlar, düşük basınç oranlarında jetin Mach diskleri ile oblik şok yapıları oluşturduğunu ve bu yapıların jette süreksiz ve ekstrem fiziki özelliklere sahip bölgeler oluşturduğunu oraya koymuştur. Düz silindirik enjektör nozulu ve kepli nozul bu parametre için incelenmiştir.

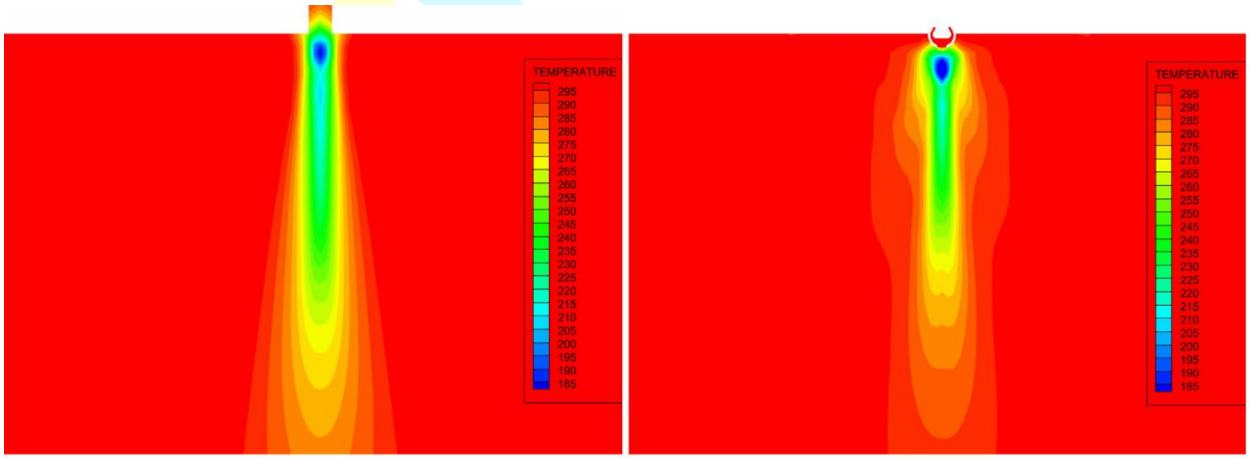


***Şekil 9**: Underexpanded jetlerin farklı formları (Reimer vd., 2023)*

Bu yapıları gözlemleyebilmek için Reimer ve arkadaşlarının kullandığı basınç oranlarına benzer bir oran olan 0.28Pc seçilmiş ve simülasyonlar iki farklı geometri için gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık görünümü göstermektedir ki 185 Kelvin gibi düşük sıcaklıklarda süreksiz bölgeler barrel shock ve mach disk ile örtüşecek şekilde ortaya çıkmaktadır.



***Şekil 10**: Kepsiz ve kepli geometrinin 0.28Pc basınç oranında 1ms anındaki basınç kontur görünümü*



***Şekil 11**: Kepsiz ve kepli geometrinin 0.28Pc basınç oranında 1ms anındaki sıcaklık kontur görünümü*

SONUÇ

Bu çalışmada, hidrojen yakıtlı doğrudan enjeksiyonlu motor uygulamalarında farklı enjektör geometrilerinin sprey karakteristikleri üzerindeki etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir. CONVERGE yazılımı ile yürütülen simülasyonlarda elde edilen veriler Tecplot 360 EX ile görselleştirilmiş ve çeşitli parametreler (sprey koni açısı, jet penetrasyon boyu, Mach disk oluşumu, kep varlığı) açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular özetle şu şekilde sıralanabilir:

1. **Sprey Koni Açısı:** Yuvarlatma artışıyla sprey koni açısı belirgin şekilde genişlemiştir. Tüm konfigürasyonlarda ortalama 25–26° olan açı, 0.5 mm yuvarlatmalı nozulda yaklaşık 30°'ye ulaşmıştır.
2. **İğneli Tip Enjektör Geometrisi:** Kep içermeyen iğneli tip konfigürasyonlarda jet yönsüz ve kısa menzilli bir yapıya sahip olmuş, oluşan mantar benzeri sprey yapısı eksenel ilerlemeyi sınırlamıştır.
3. **Kepli Geometri:** İğneli tip geometri ve tek açıklıklı kubbesel kep içeren konfigürasyonda, özellikle Pc=0.7 oranında en uzun jet penetrasyonları elde edilmiştir. Jetin merkezde odaklanarak ilerlemesi, dar ve derin yanma odalarına uygun kararlı sprey yapıları oluşturmuştur.
4. **Mach Disk ve Oblik Şok Yapıları:** Düz ve kepli nozullarda yapılan analizler göstermiştir ki; Mach disk ve oblik şok yapıları 0.28Pc basınç oranında net şekilde gözlenmiştir. Kepli geometriler, çıkışta Prandtl-Meyer süpersonik genişleme fanı etkisiyle ani genişlemeye maruz kalmış ve daha fazla sayıda oblik şok yapısı üretmiş ve her iki geometride de süreksiz bölgeler oluşmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FYL-2024-6336 numaralı projesi ile desteklenmiştir.