

Dizel Sistemlerde Emisyon, Enjektör Memesi Örneği

Ersoy BEY, Ali Cem BÖGE

Bosch Dizel Sistemleri Ürün Geliştirme Bölümü - Bursa

ÖZET

İçten yanmalı motor üreticileri, gelecekte daha da önem kazanacak emisyon kısıtlamaları sebebiyle, motorlarındaki yanma ve karışım oluşturma süreçlerini, emisyon seviyelerini azaltmak için sürekli olarak geliştirmek zorundadırlar. Dizel motorlarda oluşan emisyon seviyesi, püskürtme sistemini oluşturan parçalarla doğrudan ilgilidir. Dizel enjektör memesinin, püskürtme sisteminin önemli bir parçası olması dolayısıyla, bu çalışmanın temel konusu, meme performansının, nümerik akış analizleri, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ve sprey konumlandırma teknikleri kullanılarak iyileştirilmesidir. Bunlar temelde, yanma ve sonucunda oluşan emisyon seviyelerini etkileyen faktörlerdir.

Anahtar Kelimeler: Emisyon, dizel enjektör memesi, sprey konumlandırma

ABSTRACT

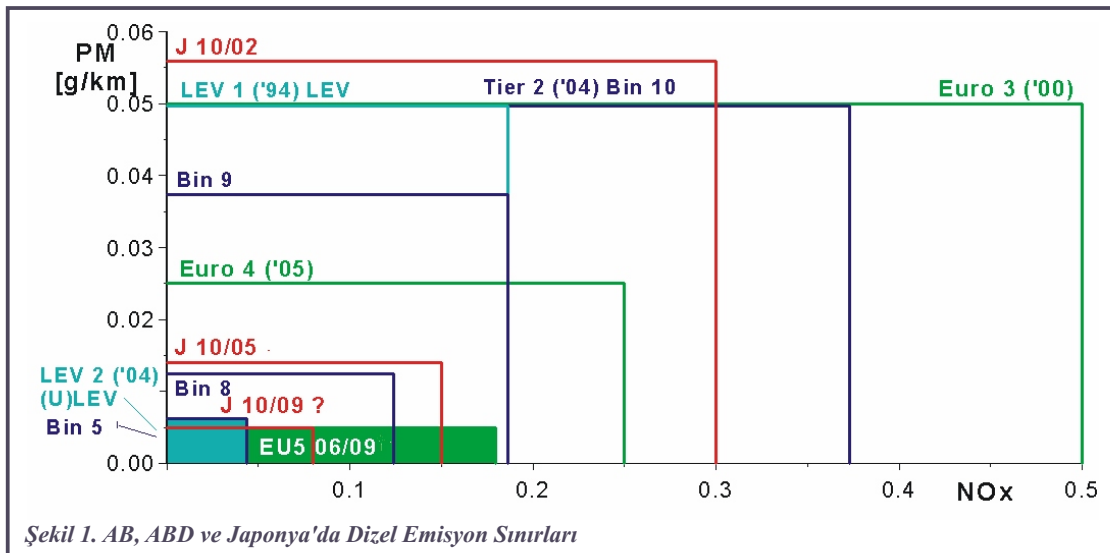
Due to the growing importance of future emission restrictions, manufacturers of internal combustion engines, are forced continuously to improve the mixture formation and combustion processes in order to reduce engine emissions. In the diesel engines, the emission levels are directly related with the components of the injection system. As the nozzle is an important component of the injection system, the main focus of this study is, how the diesel injector nozzle performance can be improved by using numerical flow simulations, namely CFD (Computational Fluid Dynamics) and by introducing spray layout techniques. These, in general, determine the characteristics of the combustion process and consequently the level of emissions.

Keywords: Emission, diesel injector nozzle, spray layout

GİRİŞ

Otomotiv sanayi, sonlu ömürlü fosil yakıtlara bağımlılığının sıkışmışlığından kurtulmaya yönelik çabalara başlamışken diğer yandan da akaryakıtların zararlı etkilerinden tamamıyla kurtulmak değilse bile azaltmanın ya da ciddi şekilde azaltmanın yollarını aramaktadır. Çevre sorunlarının insan hayatını geniş coğrafyalar boyunca tehdit eder boyutlara varmasıyla otomotiv endüstrisi kaynaklı atıklara karşı tahammül gittikçe

azalmakta ve başta Avrupa Birliği, ABD ve Japonya olmak üzere ülkeler önlemler almaya başlamakta, emisyon sınırları sertleştirilmek zorunda kalmaktadır. Bu kısıtlamalar çerçevesinde otomotiv firmalarından, motor üreticilerinden ve yakıt aksamını üreten yan sanayilerden, otomotiv kaynaklı atık gazların çevresel etkilerini azaltmaya yönelik çözümler, beklentilerin ötesinde uyulması gereken seviyeler (Euro5, Tier2 gibi) belirtilerek zorunluluk haline getirilmektedir (Bkz. Şekil1).



Şekil 1. AB, ABD ve Japonya'da Dizel Emisyon Sınırları

Zararlı etkileri kısıtlanmaya çalışılan emisyonların Avrupa Birliği tarafından konulan sınır değerleri ise Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu tabloda ayrıca 2014 yılında yürürlüğe girmesi beklenen Euro6 sınırlamasıyla ilgili öngörü de yer almaktadır.

Çevre kirliliğine yönelik kaygıların başladığı 60'lı yıllara ve öncesine göre araç emisyonları ciddi iyileşme göstermesine rağmen denge kirlenme yönünde hızla bozulmaya, hatta yavaşlatabilmenin ötesinde artan ivmeyle devam etmektedir. Emisyon seviyelerinde beklentiler hava kalitesinin düşmesini önlemek ve “kirletmemek”(ya da daha doğru ifadeyle daha az kirletmek) yönünde ilerlemektedir.

Benzinli araçlarda olduğu gibi son yıllarda kullanım

alanları¹ Türkiye'de de giderek artan dizel yakıtlı araçlarda başta Avrupa Birliği, ABD ve Japonya yıllara göre daraltılan emisyon seviyelerini bu eksenle düzenlemeye çalışmaktadır.

Dizel emisyonlar insanlar ve doğa için zehirli ve zarar verici etkileri olan kirleticileri içerir. Bu zehirli kirleticiler genellikle ideal olmayan yanma süreciyle farklı miktarlarda ortaya çıkarlar. Hidrokarbon bileşikli yakıtların yanmasında ideal olarak CO₂ (belirli oranlar üzerinde sera etkisi dolayısıyla zararlı), H₂O, O₂ ve N₂ çıktıkları beklenirken tam yanmama, yüksek basınç ve sıcaklıktaki karışım tepkimeleri, motor yağı ve katkı maddeleri karışması ve hidrokarbon bileşeni olmayan dizel yakıtların yanması biçimindeki gerçek yanma sürecinde atık gaz olarak kirleticiler ortaya çıkar.

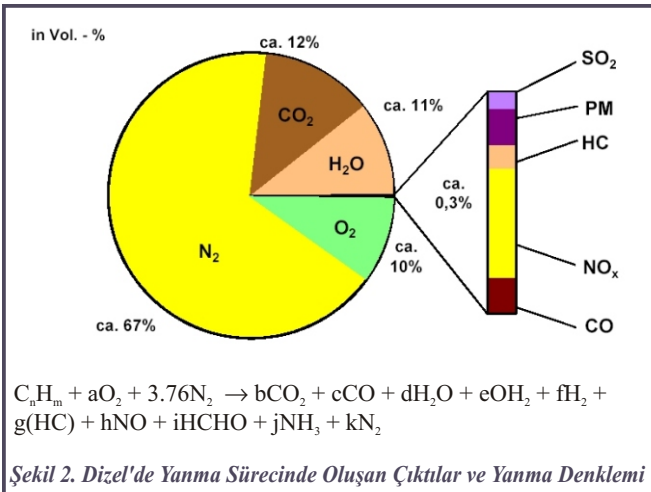
Tablo 1. AB Emisyon Standartları (Binek otomobiller) Kategori M₁*, g/km

| Seviyeler | Tarih | CO | HC | HC+NOx | NOx | PM |
|--|----------------------|-------------|-------------------|-------------|------|--------------------|
| Dizel | | | | | | |
| Euro 1† | 07.1992 | 2.72 (3.16) | - | 0.97 (1.13) | - | 0.14 (0.18) |
| Euro 2, IDI | 01.1996 | 1.0 | - | 0.7 | - | 0.08 |
| Euro 2, DI | 01.1996 ^a | 1.0 | - | 0.9 | - | 0.10 |
| Euro 3 | 01.2000 | 0.64 | - | 0.56 | 0.50 | 0.05 |
| Euro 4 | 01.2005 | 0.50 | - | 0.30 | 0.25 | 0.025 |
| Euro 5‡ | 09.2009 ^b | 0.50 | - | 0.23 | 0.18 | 0.005 |
| Euro 6‡ | 09.2014 | 0.50 | - | 0.17 | 0.08 | 0.005 |
| Petrol (Benzin) | | | | | | |
| Euro 1† | 07.1992 | 2.72 (3.16) | - | 0.97 (1.13) | - | - |
| Euro 2 | 01.1996 | 2.2 | - | 0.5 | - | - |
| Euro 3 | 01.2000 | 2.30 | 0.20 | - | 0.15 | - |
| Euro 4 | 01.2005 | 1.0 | 0.10 | - | 0.08 | - |
| Euro 5‡ | 09.2009 ^b | 1.0 | 0.10 ^c | - | 0.06 | 0.005 ^d |
| Euro 6‡ | 09.2014 | 1.0 | 0.10 ^c | - | 0.06 | 0.005 ^d |
| *Euro 1..4 seviyelerinde, binek araçlar > 2,500 kg kategori N ₁ araçlar olarak kabul edildi † Parantez içindeki değerler üretime uyma sınırları ‡ Önerilen a – 30.09.1999'a kadar (sonrasında DI motorlar IDI sınırlarına uymak zorunda) b – araçlar > 2,500 kg için 09.2010 c - ve NMHC = 0.068 g/km d - sadece DI motorları kullanan araçlara uygulanabilir | | | | | | |

¹ 1970'lerdeki petrol kriziyle birlikte motor üreticileri yakıt tüketiminin azaltılması bağlamında dizel yakıt seçeneğine yöneliyorlar. Ancak dizel motorların kullanıcılar arasındaki yaygın ve olumsuz kara duman ve bunun yanında çoğunlukla kirliliği, gürültülü, ağır ve kokulu motorlar olduğuna dair yargılarını silmek kolay olmuyor.

Bunlar Şekil 2'de görüldüğü gibi PM (Partikül Madde), NO_x, HC, CO ve SO₂'dir.

Başlangıçta motor üreticileri emisyon sınırlamalarının yakalanmasında maliyet açısından da çok zorlanmıyorlar ve “şikayetçi” olmuyorlardı. Ancak 90'lı yılların ortalarından itibaren emisyon seviyeleri üretim, malzeme ve yakıt teknolojilerinin sınırlarını zorlayacak şekilde düşürüldü. Motor üreticileri HC emisyonlarını düşürmede² oldukça başarılı olurken NO_x ve partikül madde(PM) emisyonlarının zıt yönlü davranışı dolayısıyla çalışmalarını NO_x ve PM üzerine yoğunlaştırarak, daha “duyarlı” motor tasarımları ve yakıt teknolojilerine yöneldiler. İlk elde yanma odası tasarımı, yakıt ve katkı maddeleri teknolojisinin geliştirilmesi, atık gazın yeniden kullanımı (aftreatment) çalışmaların yoğunlaştığı noktalar olarak belirlendi.



Şekil 2. Dizel'de Yanma Sürecinde Oluşan Çıktılar ve Yanma Denklemi

MOTOR TASARIMINDA EMİSYON İYİLEŞTİRMELERİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Emisyon kontrol teknolojileri içerisinde etkili emisyon düşüşleri motorda en iyi yanmayı sağlayacak hava-yakıt

karışımıyla mümkün olabilmektedir. Bu, silindir içerisine giren havanın hareketi ve yakıtın püskürme geometrisi ve atomizasyonu ile sağlanmaktadır. Emisyonların azaltılmasında NO_x ve PM'in eşzamanlı olarak düşürülmesi yönünde çabalar yoğunlaşmaktadır. NO_x kontrol teknolojileri içinde sayılabilecek örneklerden içeriye -gönderilen havayı soğutma (turboşarj) yöntemiyle; motorun yanma odasına giren hava artırılarak daha fazla yakıtın kullanılabilmesi ve daha fazla güç elde edilebilmesi sağlanır. içeriye giren havanın sıcaklığının artması kaçınılmaz bir yan etkidir ve buna bağlı NO_x artışına bir çözüm yöntemi olarak hava içeriye soğutulmuş olarak verilmektedir. Eğer sıcaklık düşüşü belli seviyelerde tutulabilirse PM artışının da önüne geçilebilir.

Yanma odasının tasarımı emisyonlar için diğer bir önemli tasarım parametresidir. Yanma odasının şekli (ör: ω- biçimi), enjektörün konumu, sıkıştırma oranları NO_x ve PM üzerinde önemli rol oynar³. Bunların yanında birçok dizel motorunda kullanılan atık gaz dönüşümü(exhaust gas recirculation), NO_x emici katalizatörler (NO_x Adsorber) kimyasal işlem, su ekleme gibi yöntemler NO_x düşürmede etkin olarak kullanılmakta, fakat diğer yandan yakıt tüketimine, PM ve HC emisyonlarına yönelik olumsuz yan etkileri de doğurabilmekte ve diğer yandan da bunların bertaraf edilmesiyle boğuşulmaktadır.

Benzer şekilde PM kontrol teknolojileri içerisinde yanma odasının tasarımı, hava şarj sistemleri, diesel oksidasyon katalizörleri ve gittikçe kullanımı artan ve Almanya'dan başlayarak kullanımı zorunlu tutulmaya başlanan dizel partikül filtreleri (DPF) sayılabilir.

Emisyon seviyelerinin düşürülmesinde diğer önemli etken yakıt kalitesinin iyileştirilmesidir⁴. Setan sayısının yükseltilmesi, kinematik viskozitenin yükseltilmesi, aromatik

² CO ve HC emisyon sınırlarına yönelik iyileştirmeler oksidasyon katalizörleri ile tuturulabilmektedir. Ancak asıl zorlu olan tam güvenilir ve iki yönde de etkin olarak NO_x ve PM'i istenen seviyelerin altına çekecek iyileştirmelerin maliyeti de düşük tutacak şekilde yaygınlaştırılmasıdır. NO_x ve PM'i eşzamanlı düşürmede oldukça güçlük çekilmektedir. Örneğin geçiktirilmiş püskürtme zamanlaması NO_x'u düşürmede oldukça yararlı iken PM emisyonlarının artmasına neden olabilmektedir.

³ Düşük sıkıştırma oranı NO_x'un düşmesini sağlar, ama bu yakıt ekonomisini olumsuz etkileyebilir ve PM'i artırabilir.

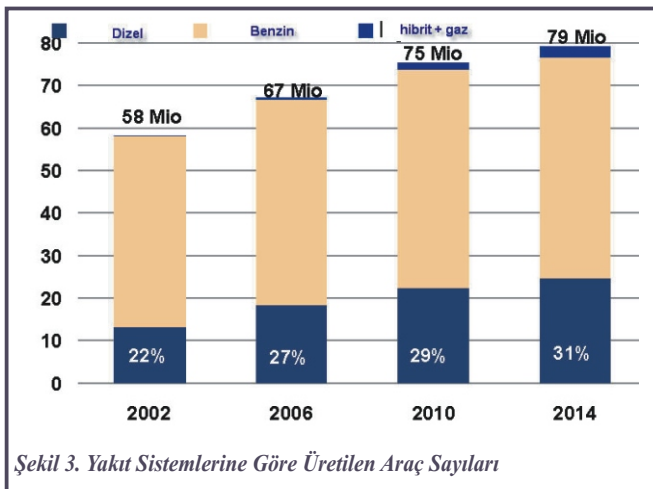
⁴ Dizel yakıt kalitesi konusunda Türkiye'de kullanıcılar halen oldukça tedirgindir. Dizel yakıt sistemleri üreticileri de yakıtlar için koydukları minimum standartları (EN 590, ASTM D 975, JIS K 2204 gibi) yakalayamayan yakıtların kullanımında ürünlerinin garanti kapsamlarını daraltabiliyorlar. Türkiye'de Ortadoğu'dan ve savaş ve karışıklık ortamındaki Irak'tan gelen “kaçak yakıtlar” ve yakıt istasyonlarının denetimsizliğinden kaynaklı olarak yakıt kalitesinde ciddi bir güvensizlik mevcuttur.

içeriğın düşürülmesi, katkı maddeleri üzerindeki geliştirmeler yakıt özelliklerinin emisyonlara etkisini gösterir. NO_x katalizatörleri ve DPF gibi teknolojiler de sülfür oranına duyarlı olduklarından, son yıllardaki sülfür oranlarının düşürülmesine yönelik iyileştirmeler bu teknolojilerin uygulanabilirliğini artırmıştır.

Ayrıca petrol kaynaklarının sınırlılığı, kaynakların belki bölgelerde dağılmış olması ve yükselen fiyatları dolayısıyla alternatif yakıtların geliştirilmesine yönelik çalışmalar önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Biodizel üretimi, geliştirilmesi ve kullanımı yaygınlařmaktadır⁵. AB Komisyonu, Avrupa Birliği'nin enerji ve iklim değişikliği stratejisi doğrultusunda sera etkisi yaratan gazların emisyonunun 2020 yılına kadar en az 20% oranında azaltılmasını karara bağlamıştır. Bu değere ulaşabilmek için en etkin yöntemlerden birinin biyoyakıt kullanımını olduğu belirlenip, biyoyakıt kullanımının 10% seviyesine çıkarılması planlanmış. Buna göre 2010 yılına kadar Avrupa'da kullanılmakta olan benzin ve dizel yakıtın 5,75%'inin bio-yakıtlardan sağlanması hedeflenmektedir⁶.

DİZEL PÜSKÜRTME (ENJEKSİYON) SİSTEMLERİ

Dizel motorlar daha ekonomik ve verimli olmalarıyla bir seçenek olarak son yıllarda giderek artan oranlarda tercih



⁵ Yakıt sistemleri üreten yan sanayiler henüz Biodizelin %100 kullanımına mesafeli durmaktadır. B5 (dizele %5 oranında biodisel karıştırılması) üzerindeki kullanımlar için garanti sınırlamaları getirmektedir.

⁶ Ocak 2007 verilerine göre Avrupa'da biyoyakıtı en çok kullanan ülkelerdeki kullanım oranları řu şekilde: Almanya'da 3,75%; İsveç'te 2,23% and Fransa'da 0,97%

edilmeye başlamıştır. Özellikle Avrupa ülkelerinde bu tercih ABD'lilere göre yakıt ekonomisini daha fazla önemsemelerinden ileri gelmektedir.

Dizel motorların yüksek verim, düşük yakıt tüketimi, güvenlik ve dayanımı öne çıkmaktadır. Ancak dizel motorlarda oldukça karmaşık yanma süreci, gerek emisyonlar gerekse performans açısından geliştirmeler ve iyileştirmelere yönelik ayrıntılı çalışmaları gerektirmektedir. Hava-yakıt karışımının oluşumu yanma biçimini tümünden etkileyen en önemli süreçtir. Çevrimde yakıt sıkışma sürecinin bitmesine yakın, piston üst ölü noktaya (top dead center -TDC) varmadan birkaç krank mili dönüşü öncesinde yakıt çok yüksek hızlarda (çıkış hızı: ~500 m/s) enjektör ucundaki meme deliklerinden püskürtülür. Çok küçük damlacıklar halinde atomize olarak yanma odasına girer. Gittikçe küçülen damlacıklar çerçevesindeki sıkıştırılmış havadan ısıyı alıp buharlaşarak yüksek sıcaklık ve basınçta tutuşmaya hazır hava+yakıt karışımını oluşturur.

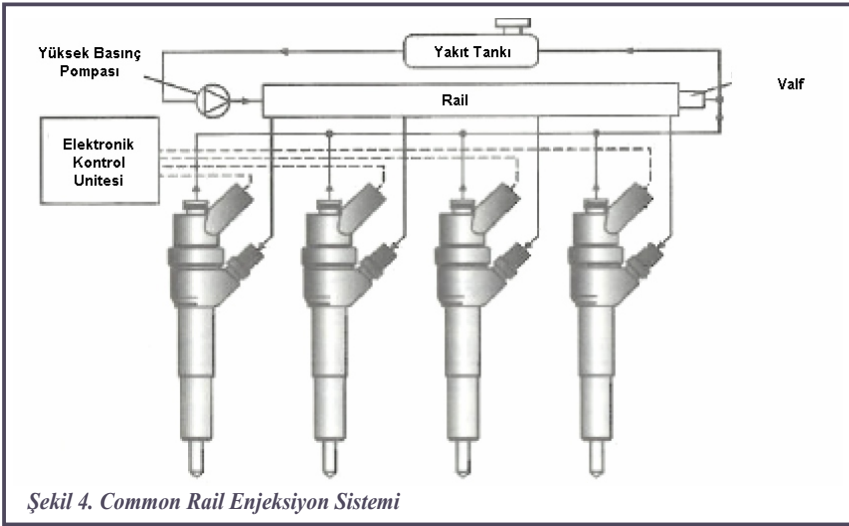
Piston üst ölü noktaya doğru hareket ettikçe sıcaklık artarak yakıt tutuşma noktasına ulaşır. Bu anlık tutuşma yanmanın başlangıcıdır ve silindir basıncını hızla artırır. Artan basınç henüz yanmamış olanların buharlaşmasına etki eder. Bu bahiste yanma sürecinde en etkin rolün hava ve yakıt karışımının olduğunu tekrar vurgulamak doğru olur. Silindire gönderilen havanın sıcaklığı ve kinetik enerjisi, püskürtülen yakıtın atomizasyonu, damlacıkların boyutu, konumsal dağılımı, püskürtme boyu, sıcaklığı ve kimyasal yapısı birincil etmenlerdir.

Yanma kalitesinden bahsedilecekse eğer en az sayılanlar kadar önemli ve karşılıklı etkileri olan diğer etmenleri de saymak gerekir. Bunlar, supap tasarımı ve konfigürasyonu (2V veya 4V : silindir başına 2 supaplı -ventil- veya 4 supaplı olması), sıkıştırma oranları, püskürtme basıncı, meme geometrisi ve püskürtme geometrisi.

DİZEL PÜSKÜRTME (ENJEKSİYON) SİSTEMİ TİPLERİ

Enjeksiyon sisteminin temel amacı, kısa bir süre zarfında, yakıtı atomize ederek buharlaştırmak ve buharlaşan ve parçacıklara ayrılan yakıtın hava ile karışımını sağlamaktır. Farklı yanma odası geometrilerine göre, farklı sprey püskürtme geometrileri oluşturulmalıdır.

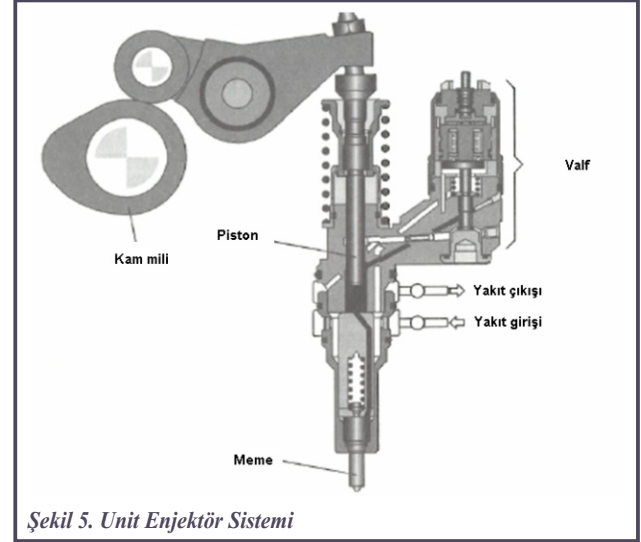
Günümüzde 2 farklı yüksek basınçlı püskürtme sistemi kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi “Common Rail Enjeksiyon Sistemi” olup, yüksek basınç oluşumu ve enjeksiyon birbirinden bağımsızdır. (Şekil 4)



Şekil 4. Common Rail Enjeksiyon Sistemi

Kam milinden hareket olarak oluşturulan enjeksiyon sistemlerinin aksine, Common Rail enjeksiyon sisteminde yakıt püskürtmesinde geniş bir esneklik mevcuttur. Bunun temel sebebi, yüksek basıncın bir pompa vasıtasıyla, rail denen ve bir boru şeklinde olan elemanda sürekli olarak oluşturulmasıdır. Bunun sonucunda raildeki yüksek basınç oluşumu, motor devrinden bağımsız olup, motor çalışma koşullarına göre optimum püskürtme parametrelerinin ayarlanmasında geniş bir esneklik sağlar.

İkinci grup, yakıt enjeksiyon sistemlerinde ise, basınç oluşumu ve yakıtın püskürtülmesi aynı zamanda olup, birbiriyle ilişkilidir. Bu sistemler hareketini kam milinden



Şekil 5. Unit Enjektör Sistemi

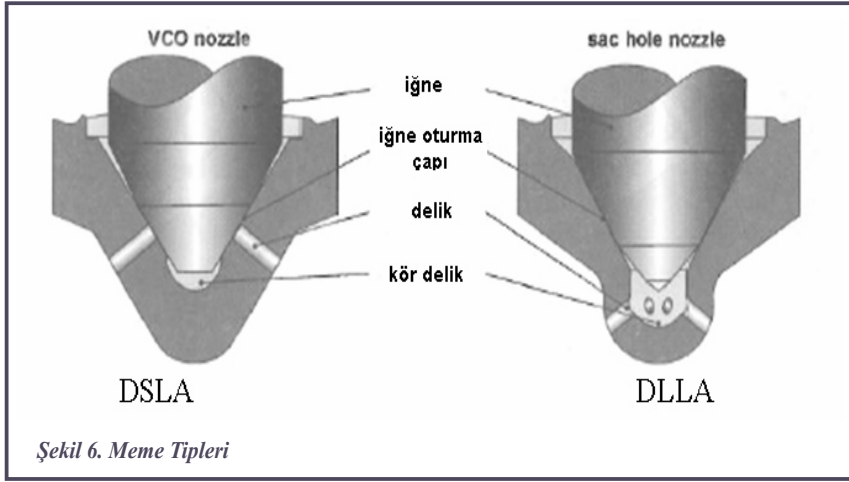
alır. Yüksek basınç sadece kam milinin belirli açıları için sistemde mevcuttur. Kam profili, yüksek basıncı oluşturan piston hareketinde belirleyici olup, sistem basıncı kam açısının bir fonksiyonudur (Şekil 5). Sistem içerisinde yüksek basınç borularının ve pompanın olmaması, püskürtme basıncınının 200 MPa mertebelerine ulaşmasını sağlar.

MEME TİPLERİ VE MEME GEOMETRİSİ

Enjeksiyon sisteminin en önemli parçası memedir. Meme yakıtı yanma odasına püskürten eleman olup, meme üzerindeki deliklerin sayısı ve konumları, püskürtülmek istenilen yakıt miktarına bağlıdır. Direk enjeksiyonlu dizel motorlarla kullanılan 2 tip meme vardır. Bunlar DSLA ve DLLA'dır⁷ (Şekil 6).

DLLA memelerde, DSLA memelerden farklı olarak iğnenin altında ekstra bir hacim vardır. İğnenin oturma çapı ve delikler arasındaki mesafe uzun olduğu için, iğnenin radyal yöndeki hareketinin, farklı deliklerden püskürtülen yakıt miktarlarına etki olmadığından dolayı, simetrik bir püskürtme şekli sağlanır. Diğer taraftan iğne ucunun altında kalan kör deliğin hacminin büyüklüğü hidrokarbon

⁷ DSLA: Sitzlochdüse (alm.), VCO: Valve Covered Orifice (ing.): deliklerin oturma yüzeyinde olduğu tip
DLLA: Sacklochdüse(alm), Sac Hole Nozzle(ing.): deliklerin kördelik kısmında olduğu tip



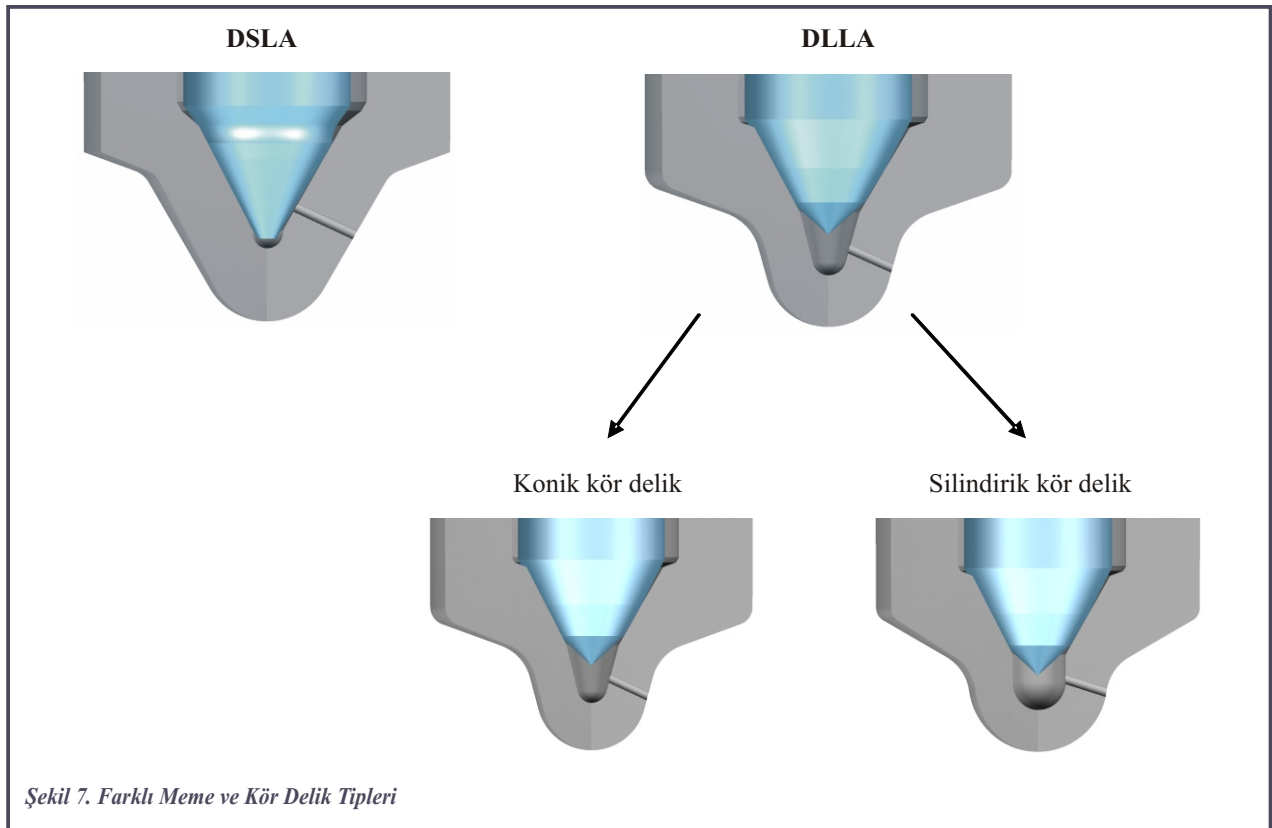
emisyonlarının miktarını artıran bir faktördür. O yüzden bu hacmin mümkün olduğunca küçültülmesi gereklidir. Bu hacimde biriken yakıt, püskürtme sonrasında, yanma odasına girerek emisyonları artırır. DLLA memelerde, kullanılan farklı (konik ve silindirik) kör delik geometrileri mevcuttur(Şekil 7).

Bu açıdan kıyaslandıklarında DSLA memeler DLLA memelerden daha üstün gözüktür. Ama DSLA memelerin tasarımında özel teknikler kullanılarak, iğnenin radyal hareketinin önlenmesi gerekmektedir. Çünkü bu radyal

hareket sonucunda oluşacak eksentiriklik, deliklerden geçecek yakıtın kontrol edilememesi ve oluşacak spreyn kalitesinin bozulması sonucunu doğurabilir.

Basıncılı yakıtın yanma odasına püskürmeden önceki son durağı olan meme, elbette ki bu yönüyle yanma için belirleyicidir. Standart olarak bir iğne ve gövdeden oluşan ve alan farklarını kullanarak, yay kuvvetini yenerek hızla yükselen iğne ile yakıt meme deliklerinden

püskürür. Yüksek basınç, sıcaklık, yanma sonrası oluşan atık gazlar, kurum vb. birçok etkene karşı iğne ve memenin, enjektörün kendisine biçilen ömrü boyunca, performans düşümü olmadan (debideki oynamaların belirlenen, kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması), motora ve silindir blokuna zarar verecek sızıntılar olmadan çalışması beklenir. İstenen performansın sürdürülebilirliği için bu çalışma süresi içerisinde aşınmanın, kurumlaşmanın en düşük seviyelerde kalmasının yukarıda sayıldığı üzere hava akışı, yakıt kalitesi, yanma odası tasarımı, sıkıştırma oranları,

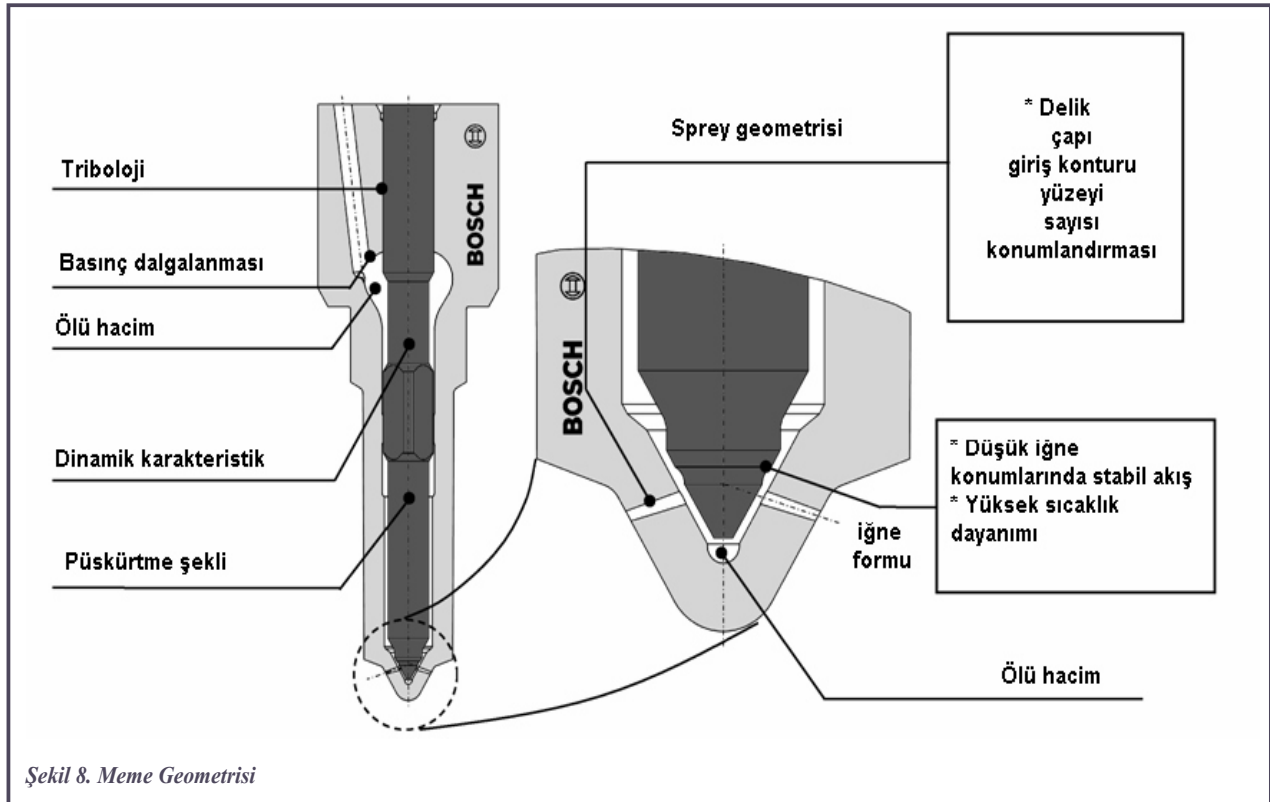


enjektörün konumu vb. birçok değişkenin belirleyen olduğundan farklı motor uygulamalarının her biri için oldukça ayrıntılı incelemeler, validasyon süreleri gerektirir.

İğne ve meme gövdesinin malzeme seçimi yanında iğne geometrisi farklı motor uygulamalarının tavrına göre biçimlendirilebilir⁸. Gövde geometrisi meme içindeki akışkanın davranışını ve yanma kalitesini etkiler. Deliklerin yerleştirildiği kör delik boyutu da yine emisyonları doğrudan etkileyen bir özelliğe sahiptir. Kördelik hacminin düşük olması emisyonlar açısından yeğdir⁹. Bahsedildiği şekilde farklı uygulamalarda değişik sonuçlar verebilen birçok etmen enjektörün çalışmasını, yanma kalitesini ve emisyonları etkileyebilir. Bunlar içerisinde enjektör memesi cephesinden iğne kısılma etkisi, iğne ve gövdenin yataklanması (2-3 µm boşluk), iğne oturma çapı, iğne tam açılma yüksekliği, iğne ucu açıları ve delik geometrisi sayılabilir. Delik geometrisi meme içindeki akışı ve sonrasında püskürtmenin biçimini belirler.

Meme, enjeksiyon sistemlerinin en önemli ve etkin elemanı olması sebebiyle, meme geometrisi, -ki bunun içerisine delik çapı, delik konturu, delik sayısı, deliklerin konumlandırılması, iğne oturma çapı, kör delik hacmi vb. girer-, elde edilecek olan sprej geometrisi ve bunun sonucunda motor performansı ve emisyonları doğrudan etkiler (Şekil 8).

Meme geometrisinin tanımlanmasında kullanılan önemli geometrik ölçülere bakıldığı zaman bunların gerçekten de küçük nicelikler olduğu anlaşılabilir. Örneğin delik boyu 1mm mertebelerinde iken delik çapı 150-200 µm düzeylerindedir. Dolayısıyla bu geometri üzerinde deney yapılarak sonuçlarının meme tasarımında kullanılması gayet zordur. Bunun yerine yapılabilecek bir alternatif çözüm, farklı geometrik ölçülerin meme performansına olan etkilerini Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, HAD (CFD : Computational Fluid Dynamics) analizleriyle incelemektir.



Şekil 8. Meme Geometrisi

⁸ Örneğin zaman içindeki aşınmayla basınç düşümüne karşı geliştirilen iğne geometrisi.

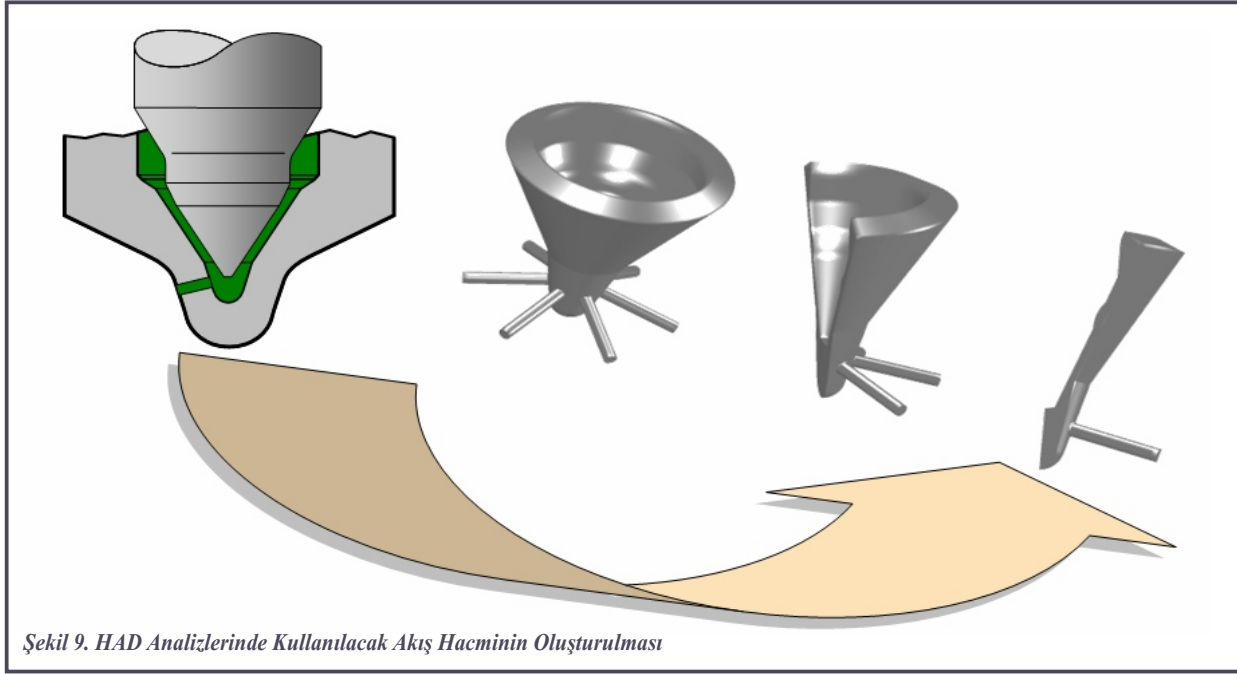
⁹ İğne kapandıktan sonra deliklerin altındaki boşlukta biriken ve püskürmemiş yakıt yanma bittikten sonra ve piston aşağıya doğru inerken "vakum" etkisiyle silindirin içine çekilir ve yanmamış olan bu yakıt emisyonları olumsuz etkiler. Kördeliğin hacminin düşük olması burada biriken yakıt miktarını azaltır.

MEME İÇ AKIŞININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YARDIMIYLA İNCELENMESİ

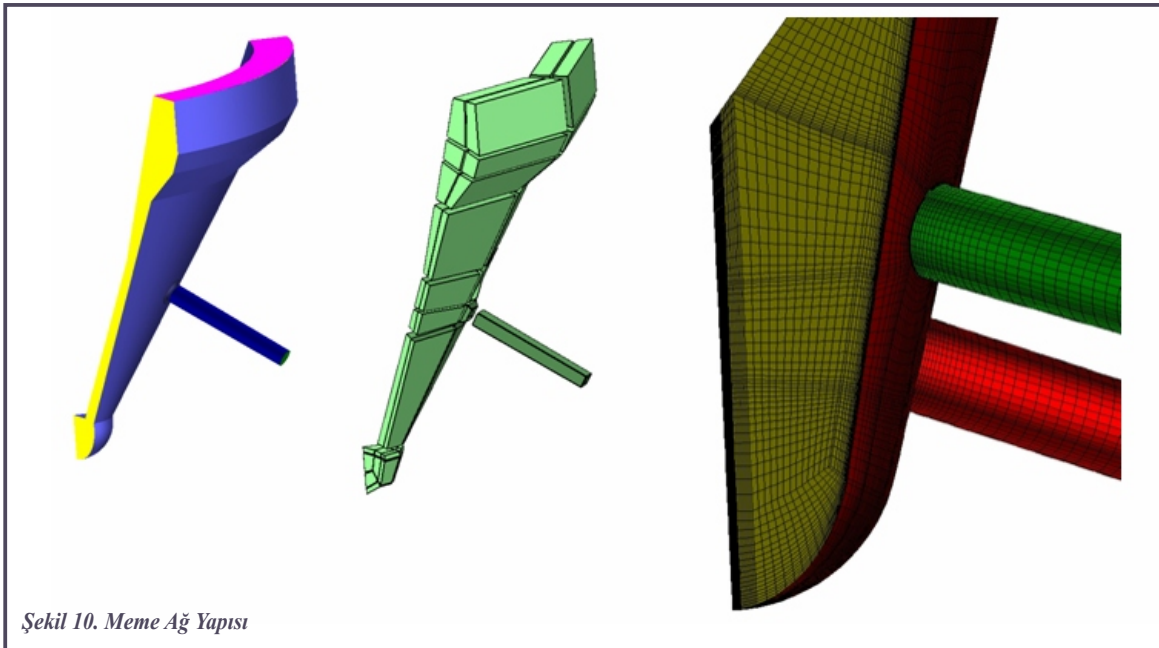
HAD günümüzde çok fazla uygulamaları olan nümerik modelleme tekniğidir. Temel uygulama alanları otomotiv endüstrisi, havacılık ve uzay sanayi, turbo makinalar, kimyasal prosesler, biomedikal uygulamalar, iklimlendirme ve klimalandırma olarak özetlenebilir. Hepsindeki temel yaklaşım, öncelikle üzerinde analiz yapılacak bir geometri

oluşturulması, bu akış hacminin ufak hacimlere bölünerek ağ yapısı yaratılması ve sınır ve çalışma koşulları belirlenerek akışkana ait özelliklerin tanımlanması, sayısal çözümleme ve sonuçların yorumlanmasıdır.

Meme iç akışını incelemek için öncelikle üzerinde çözüm yapılabilecek bir geometriye ya da diğer bir deyişle akış hacmine ihtiyaç vardır. Bu akış hacmi, iğne ve gövde arasında kalan hacim olarak tanımlanabilir. Şekil 9'da görülebileceği üzere bu hacim bir bütün olarak HAD



Şekil 9. HAD Analizlerinde Kullanılacak Akış Hacminin Oluşturulması



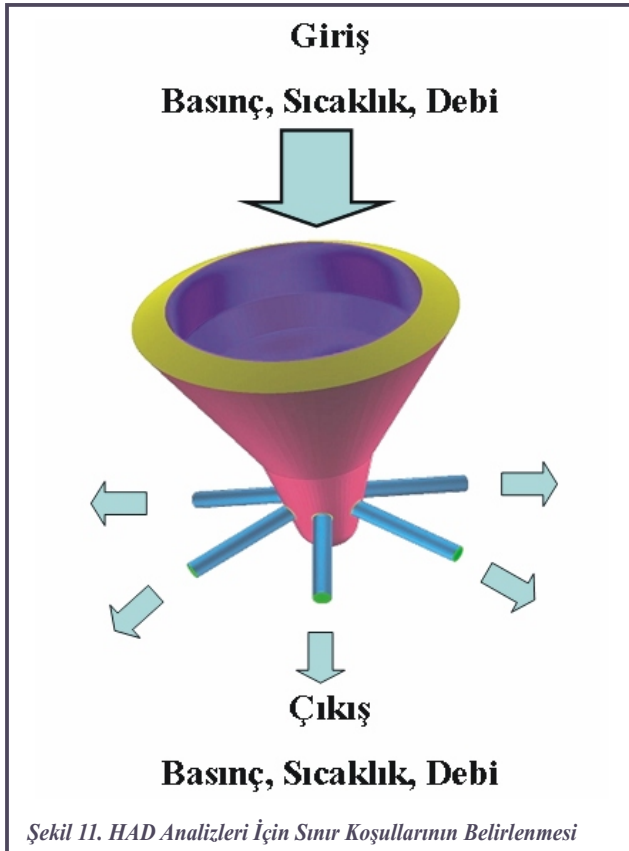
Şekil 10. Meme Ağ Yapısı

analizlerinde kullanılabilceği gibi, eğer delikler simetrik ise bu hacmin sadece bir delikli modeli de hesaplamalarda kullanılabilir. Buradaki amaç çözüm süresini kısaltmaktır.

Sonraki adım, oluşturulan bu hacim üzerinde ağ yapısının yaratılmasıdır. Yaratılan bu ağ yapısı, uygulamalara göre farklılık göstermesine rağmen temelde katı yüzeylere yakın bölgelerde sınır tabaka etkilerine modelleyebilmek için, daha fazla eleman kullanılması gerekmektedir(Şekil 10).

Meme çalışma koşulları, HAD analizinde kullanılması gereken sınır koşullarını belirler. Burada yapılması gereken, meme giriş ve çıkışında basınç, sıcaklık, debi, hız gibi parametrelerin tanımlanmasıdır. Ayrıca kullanılan akışkanın, malzeme özelliklerinin viskozite, yoğunluk gibi, tanımlanması yapılmalıdır (Şekil 11). Bu aşamada kullanılması istenilen türbülans modeli ve kavitasyon modeli ve parametreleri belirlenmelidir.

Son aşama ise, belirlenen geometri ve çalışma koşullarına bağlı olarak istenilen çözümün alınması ve sonuçların yorumlanmasıdır. Dikkat edilmesi gereken nokta, sayısal bir



analiz yapıldığı için çözümün yakınsayıp yakınsamadığıdır. Bu yorum yapılırken, HAD analizlerinde kullanılan genel kriterlerden faydalanılabilir.

MEME İÇ AKIŞI HESAPLAMA ÖRNEKLERİ

Örnek 1 : Delik konikliğinin akışa etkisi

Uygulamaya bağlı olarak, farklı meme delik geometrileri kullanılabilir. Delik konikliğinin tanımlanmasında Bosch tarafından kullanılan ifade aşağıdaki şekildedir.

$$k = \frac{D_{\text{inlet}} [\mu\text{m}] - D_{\text{outlet}} [\mu\text{m}]}{10}$$

k : Delik konikliği

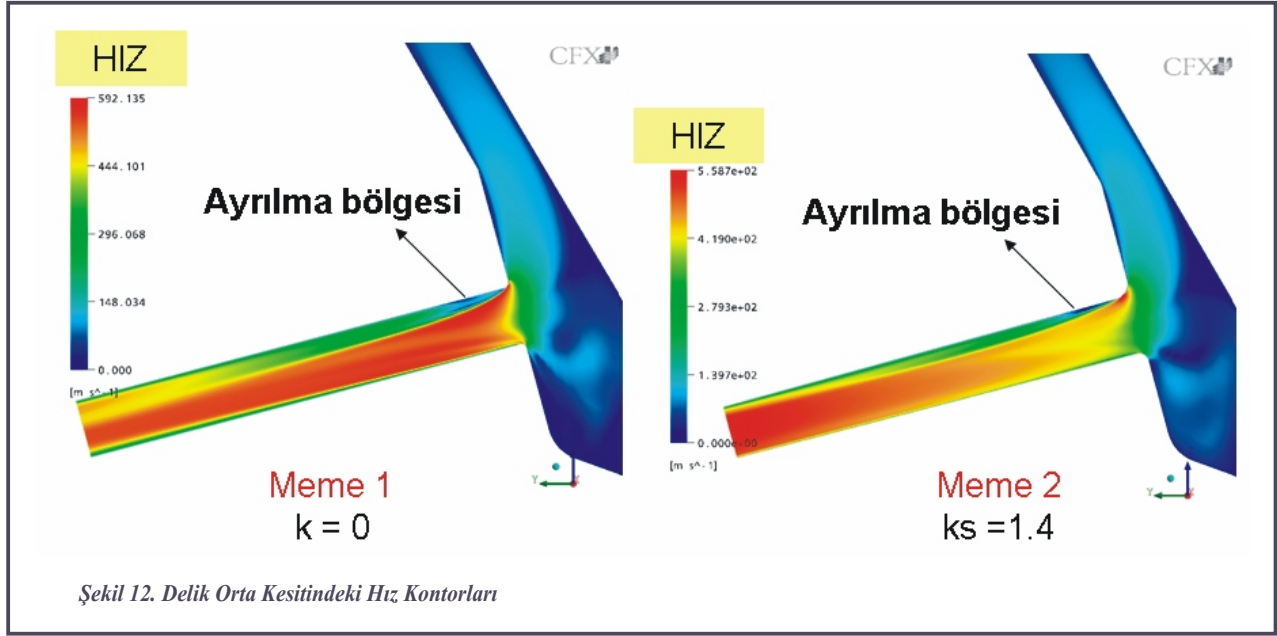
D_{inlet} : Delik giriş çapı (μm)

D_{outlet} : Delik çıkış çapı (μm)

Delik konikliğinin fazla olduğu memelerde (büyük k faktör), oluşan spreynin meme çıkışında oluşturduğu spray koniklik açısı daha düşük olup, spray kırılma uzunluğu (break-up length) daha fazladır. Bunlar motor performansını ve emisyon değerlerini etkileyen faktörler olduğu için HAD analizleriyle incelenmesi meme geliştirme çalışmaları açısından önemlidir.

Bu örnekte, Bosch Dizel Sistemleri Ürün Geliştirme Bölümünde, $k=0$ ve $k=1.4$ değerlerine sahip 2 meme CFD kullanılarak kıyaslanmıştır. Delik konikliğinin meme iç akışına etkisinin incelendiği bu çalışmada giriş basıncı 1350 bar ve çıkış basıncı ise 1 bar olarak alınmıştır.

Şekil 12'de delik orta kesiti boyunca gösterilmiş hız konturları incelendiğinde giriş bölgesinin üst kısmında düşük hız bölgesi ya da ayrılma bölgesi gözlemlenebilir. Bu bölgelerde, akış dönme çapını takip edemeyerek duvardan ayrılmaktadır. Bunun sonucunda akışın kullandığı kesit alan daralmakta ve memeden geçirilebilecek debi miktarında kısılma meydana gelmektedir. Bu düşük hız bölgesinin büyüklüğü k faktörün büyümesi ile küçülmektedir. Diğer önemli bir nokta ise, $k=1.4$ memesi için çıkış yüzeyinde daha düzgün bir hız dağılımı sağlandığıdır.



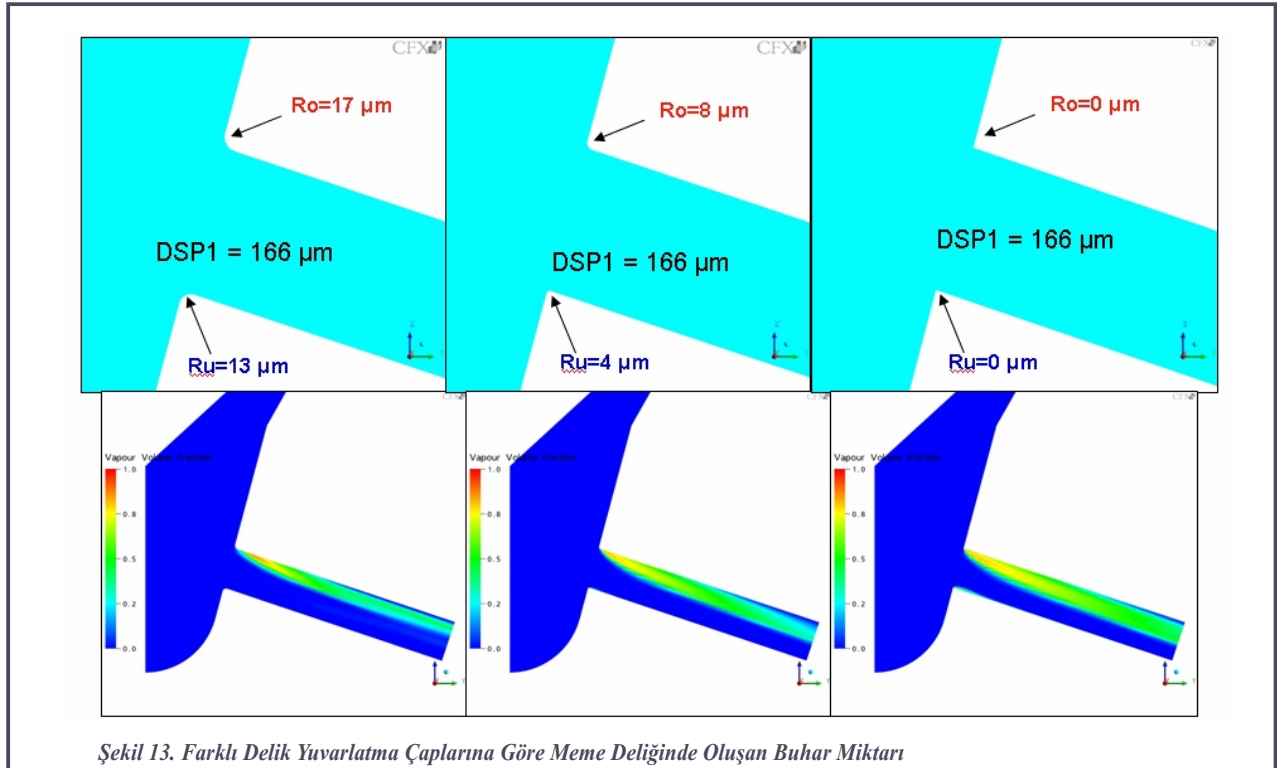
Örnek 2 : Delik yuvarlatma çaplarının akışa etkisi

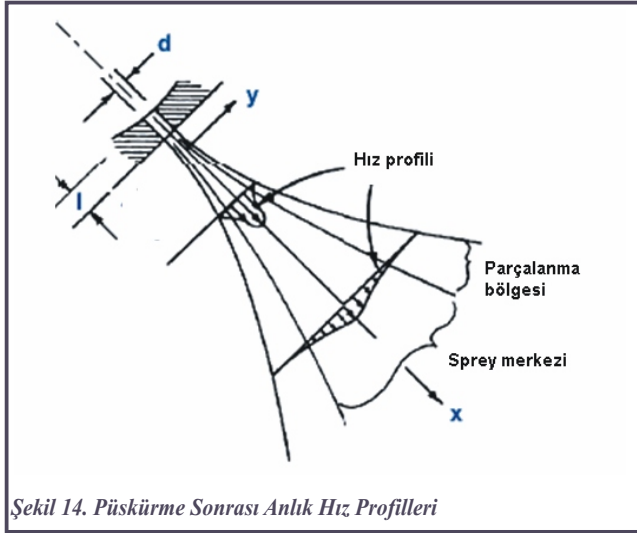
HAD kullanılıp, meme içerisinde oluşan buhar miktarı hesaplanarak, memede oluşan kaviteasyon ile ilgili analizler yapılabilir. Oluşan buhar miktarının bağlı olduğu en önemli parametrelerden biri, meme girişindeki yuvarlatma çaplarıdır. Bu çaplar Şekil 13'de R_o ve R_u ile belirtilmiştir. Bu örnekte aynı delik çapına sahip, fakat farklı yuvarlatma çaplarına haiz 3 meme buhar oluşumu bakımından kıyaslanmıştır. Oluşan buhar

keskin köşeli memede ($R_o=0$, $R_u=0$) en fazla, yüksek yuvarlatma çaplarına sahip memede ($R_o=17 \mu\text{m}$, $R_u=13 \mu\text{m}$) ise daha azdır.

SPREY FORMU

Dizel yakıt püskürtme sistemlerinin karmaşık ve sofistike yapısı tümüyle en uygun spreyn silindire, silindir içindeki yanma odasına hedeflenmesiyle ilintilidir ve bununla yükümlü olan memenin kendisidir.





Şekil 14. Püskürme Sonrası Anlık Hız Profilleri

Püskürtmenin davranışı emisyon oluşumunda kritik olarak belirleyicidir.

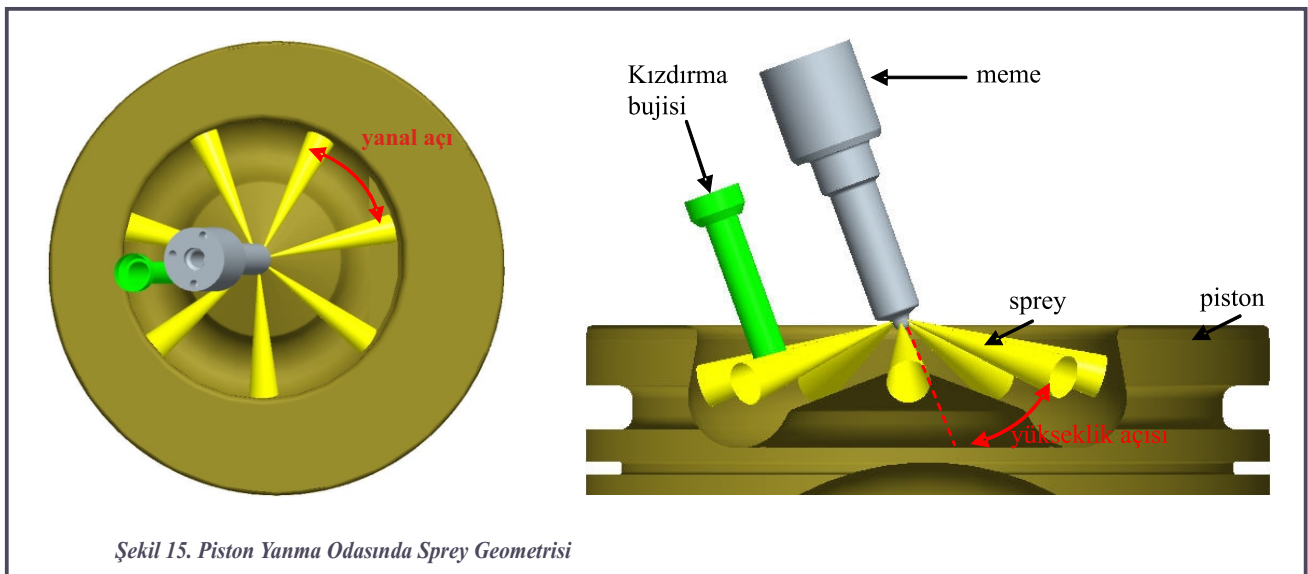
İğnenin açılmasından yakıtın kesilmesi (iğnenin kapanmasına) kadar olan süre içerisinde püskürtme hızı damlacık oluşumu, karışımı, saçılımı ve dolayısıyla yanmanın niteliğini etkiler. Düşük hızlarda damlacıklar daha büyük¹⁰, yüksek hızlarda damlacıklar küçülür, momentumun en düşük olduğu nokta olan sprej kırılma uzunluğu artar. Püskürtme delik eksenine doğrultusunda hareket ederken şekildedeki biçimde açılmaya başlar.

SPREY GEOMETRİSİ

Yakıt püskürtme sistemlerinin yanmaya varacak tüm

etkinliğinin son çıkış noktasıdır meme püskürtme delikleri. Öncesindeki “onca çabanın” en uygun hava-yakıt karışımının eldesi olması dolayısıyla en iyi yanmayı sağlayacak delik geometrisi tasarımı bir zorunluluktur. Silindirin içine gönderilen havanın akışı, yönü ve hızı, pistonun yanma odasının şekli ve konumu, püskürtmenin başlayacağı zaman, üst ölü noktanın silindir kafasına olan mesafesi, memenin silindir kafasından yanma odasına doğru çıkma boyu, meme eksenini ile piston çalışma eksenini arasındaki açı (eğim), memenin piston eksenine göre konumu, yanma odasının piston eksenine göre konumu, kızdırma bujisinin piston eksenine göre eğimi ve konumunun her biri püskürtme delikleri geometrisinin belirlenmesinde etmelidir.

Delik sayısı belirlenirken silindire giren havanın hızı ve yönü önemlidir. Eğilim mümkün olan en fazla delik sayısına ulaşmaktır. Ancak memenin kubbe dayanımı ve delikler arası kritik mesafe delik sayısını sınırlamada dikkate alınmalıdır. Yanma genellikle havanın akışına (varsa kızdırma bujisinin de konumuna göre) bağlı olarak önce bir sprejde başlar. Henüz diğer sprejlerde tutuşma başlamadan önce ilk tutuşan sprejden çıkan ve belli oranda yanmasını tamamlamış (yanma için “kötü”) hava komşu sprejin olduğu konuma doğru gelerek bu bölgede yanmanın kalitesini düşürebilir. Bu durum delikler arası mesafe kısaltıldığında daha çok etki edebileceğinden delik sayısının artmasında kısıtlar.



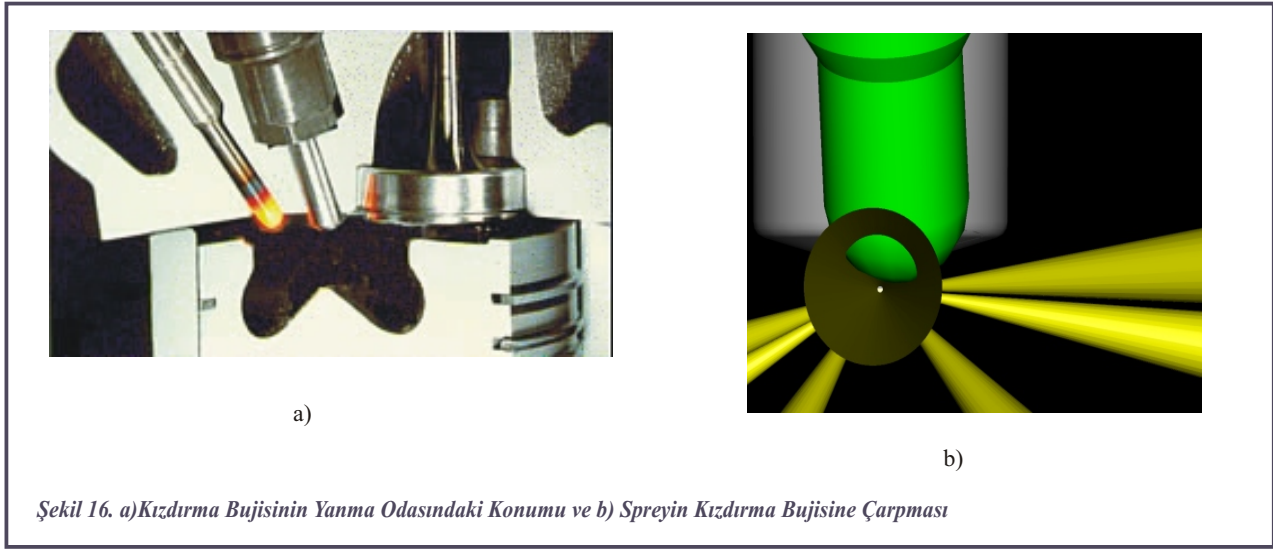
Şekil 15. Piston Yanma Odasında Sprej Geometrisi

¹⁰ Yüksek basınçlı püskürtme sistemlerinde damlacık çapı 6-15 µm dolaylarındadır

Deliklerden püskürtülen yakıtın hava ile karışarak yanma odasında en optimum yanmayı sağlayacak noktaya vurması hedeflenir. Motorlarda hava akışının ve hava yakıt karışımını, spreyi etkileyecek etmenlerin farklılıklar göstermesi dolayısıyla spreyin yanma odasındaki geometrisine yönelik denemeler yapılması zorunludur. En optimum nokta için farklı

Kızdırma bujisinin bulunduğu durumlarda yanal ve yükseklik açıları spreylerin hiçbir koşulda kızdırma bujisine çarpmayacak şekilde belirlenir. Spreyin kızdırma bujisine çarpması halinde emisyonlar kötüleşirken, diğer yandan kızdırma bujisinin ömrü de kısalmır (Şekil 16.b).

Dizel motorolar belli sıcaklık sınırları altında çalışmaya



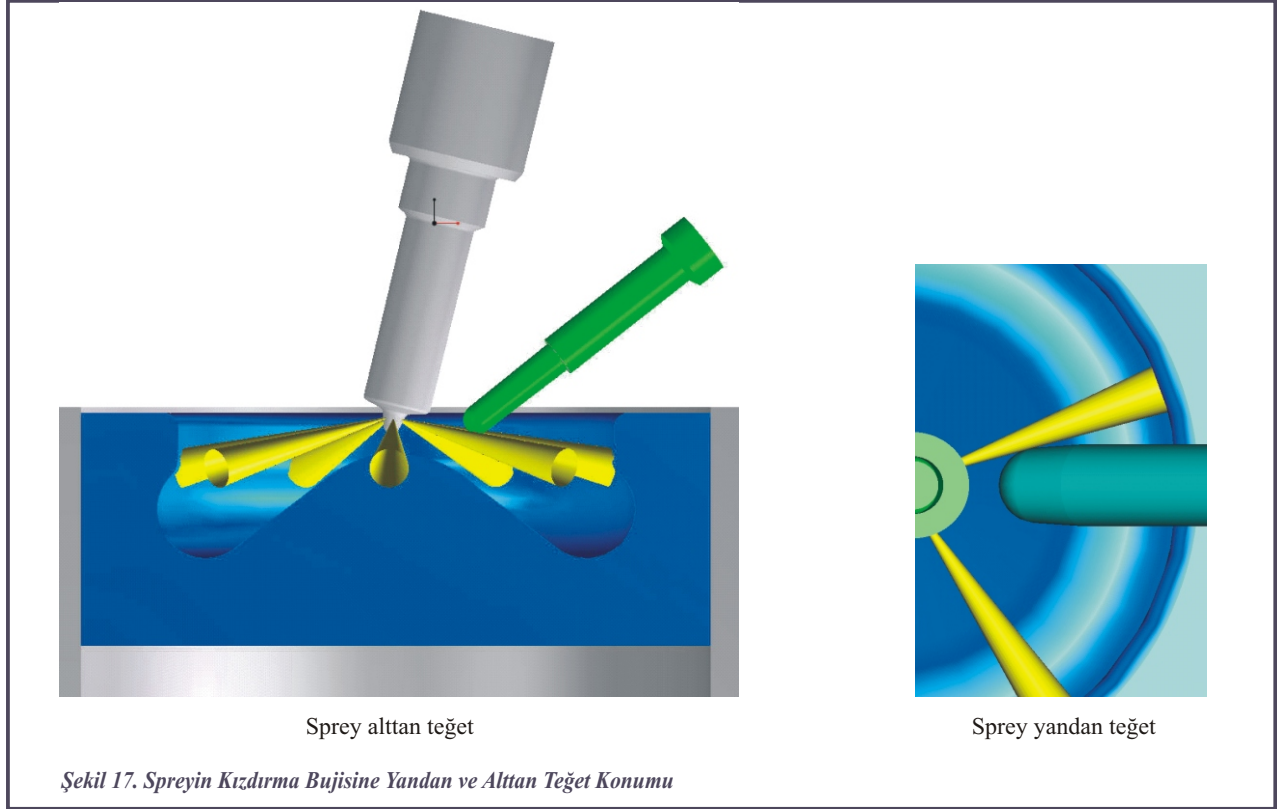
Şekil 16. a) Kızdırma Bujisinin Yanma Odasındaki Konumu ve b) Spreyin Kızdırma Bujisine Çarpması

püskürtme açıları ve çarpma noktaları (spreylerin püskürme açıları değiştirilerek) denenir. Eğimin olduğu ve memenin piston ekseninden kaçık olduğu durumlar için her bir deliğin yükseklik açısı, yanal açısı ve kördelikteki konumu ayrı ayrı hesaplanır. İstenen, deliklerden çıkan yakıtın yanma odasında aynı düzlemde vurmasıdır. Burada havanın hareketinin yakıt damlacıklarının doğrultusuna etkisi de (dinamik etki) dikkate alınarak hesaplamalar yapılır.

Motor üreticileri için dizeldeki yanmanın karmaşık yapısı dolayısıyla en elverişli yanmayı sağlayacak sprey geometrisini belirlemek önem kazanmaktadır. Spreyin yanma odasındaki çarpma noktalarını belirleyebilmek için çeşitli farklı püskürme açılarında denemeler yapılır¹¹. Spreyin çarpma yükseklikleri yükseklik açısıyla belirlenirken, yanal açılarla birlikte spreyin yanma odasında çarpacağı konum verilir. Yanal açılar belirlenirken yukarıda da belirtildiği üzere delik sayısı ve delikler arası mesafe önemlidir.

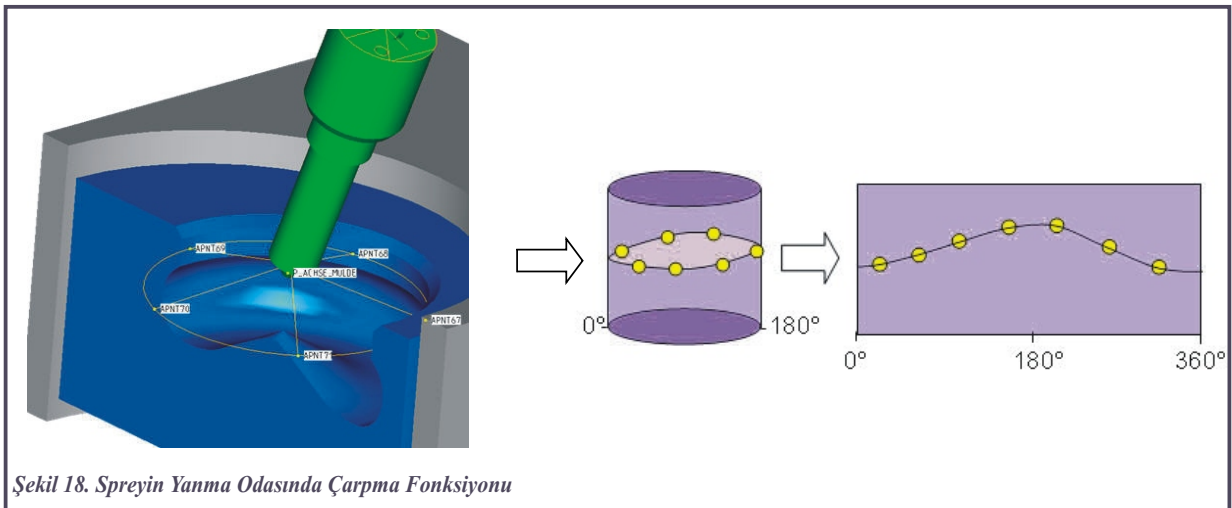
başlamak için yardımcı bir ekipmana gereksinim duyarlar. Örneğin DI-motorlarda bu sınır ortam sıcaklığı olarak 0 °C'nin hemen altındadır. Bu yüzden, binek otomobiller gibi düşük sıkıştırma oranlı motorlarda, düşük sıcaklıklarda silindirin içine giren hava ve yakıt karışımının hızlı bir şekilde ısınmasına ve tutuşma sıcaklığına daha çabuk ulaşmasına yardımcı olacak düzeneklere ihtiyaç vardır. -18 °C gibi soğuk çalışma ortamlarında motor 27 °C'lik bir ortama göre 5 kat daha zor çalışmaya başlamaktadır. Yeni nesil kızdırma bujileri 4s kadar süre içinde 850-1000 °C'ye kadar kızdırılarak piston yanma odasına giren hava-yakıt karışımının belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasına etki etmektedir. Özellikle soğuk çalışma koşullarında kızdırma bujisine en yakın spreyin konumu önem kazanmaktadır. İlk tutuşmayı başlatacak spreyin kızdırma bujisine yakınlığı etki süresini kısaltmaktadır. Bu yüzden ilk tutuşmayı başlatacak spreyin kızdırma bujisine “mümkün” olan en yakın konumda püskürtülmesini sağlamak üzere hesaplamalar yapılır. Bunun “mümkün” olma durumu için iki

¹¹ Yanmanın simülasyonu üzerine çalışmaların gelişmesi, dinamik etkinin daha iyi yorumlanabilmesi ve önceki deneyimlerin çıkarımında yapılan teorik hesaplamalar ve yaklaşımlarının optimum sonuca ulaşmada deneme sürelerini gün geçtikçe azaltmaktadır. Emisyon sınırlamalarının her geçen gün keskinleştirildiği günümüzde, maliyetleri artırmamak için bu bir zorunluluktur.



ayrı hesaplama yöntemi kullanılmaktadır. Tutuşturucu spreyn (ignition spray) yanal veya alttan teğet olması (Bkz. Şekil 17). Her iki seçenekte de meme deliklerinin (yani spreyn) konumunu etkileyen ölçü toleransları en kötü koşul (worst case conditions) yöntemine göre hesaplamalara katılır. Enjektörün motora, memenin enjektöre, deliklerin memeye göre konumlarını belirleyen ölçü toleransları spreyn ve kızdırma bujisi arası mesafeyi küçültecek yönde ele alınarak, en kötü koşulda (tüm toleransların spreyn kızdırma bujisine değme riskini artıracak yön) dahi değmeyecek ama teğet olacak kadar

yaklaşacak şekilde konumu belirlenir. Böylece tutuşturucu spreyn kızdırma bujisine hiçbir koşulda çarpma olmadan olası en yakın konuma getirilir ve daha çabuk etki etmesi sağlanır. Soğuk çalışma ortamlarına yönelik bu yöntemle spreyn geometrisinin belirlenmesi sayesinde motorun soğuk ortamda çalışma davranışında ve dolayısıyla emisyonlarında da iyileşme olur. Örnek olarak, yapılan bir testte -25°C 'lik soğuk çalışma ortamında standart bir enjektör 8. saniyede çalışmaya başlarken yukarıda bahsedilen yöntemle spreyn geometrisinin belirlendiği bir enjektörle çalışan motorun ilk 4s içinde



çalışmaya başladığı görülmüştür. Modern kızdırma bujileri motor çalışmaya başladıktan sonra da 180 saniyeye varana dek çalışarak emisyonları iyileştirici ve soğuk motorun ısınması sürecinde oluşan gürültüyü azaltıcı bir işlev görür. Özetle iyi bir soğuk çalışma davranışı için spreyn konumu mutlaka kızdırma bujisinin yeri dikkate alınarak optimize edilmelidir.

Daha önce de belirtildiği üzere spreyn dağılımı yanma odasına ve hava akışına en fazla uyum sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Motorun farklı yüklenme durumlarına göre yanma odası duvarında spreyn çarpma noktalarının en iyi konumunun belirlenmesi önemlidir. Motor üreticileri bunun için spreyn geometrileriyle denemeler yapmaktadır.

Şekil 18'de görülen spreyn çarpma fonksiyonu, bu denemeler arasındaki farkları motordaki çarpma noktaları üzerinden kıyaslayabilmeyi, yeni ve daha doğru kestirimlerde bulunabilmeyi sağlar. Şekilde, piston silindir içinde üst ölü noktada iken spreyn eksenlerinin yanma odasındaki geometrik çarpma noktaları ve 360 derecelik silindirik çevrenin açılmış halinin fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Hesaplamalara uyumlu olarak denemeler sonucunda enjektörü dik bağlanmış ve yanma odası silindirinin merkezinde olan bir 4V motorun spreyn çarpma noktaları yatay bir düzlemde olurken, merkezden kaçık ve eğimli bağlanmış bir enjektöre ait spreyn çarpma noktaları fonksiyonu değişken eğimli olarak belirlenir. Memenin deliklerinin yan açılarının belirlenmesi sırasında da enjektörün konumunu belirleyicidir, zira yan açılar her bir spreye eşit hava düşecek bir oranlama kurularak hesaplanır.

SONUÇ

Dizel enjektör memesinde yapılabilecek geliştirme faaliyetlerine örnek olarak iki temel konu incelenmiştir: Meme içi akış simülasyonları ve spreyn konumlandırma teknikleri.

Meme içi akış simülasyonlarının gelişen bilgisayar teknolojileriyle beraber daha fazla uygulama alanı bulması kaçınılmazdır. Simülasyon, olayın fiziğini anlamaya yönelik bilgi birikimini artırırken, diğer taraftan da günlük problemlerin çözümünde vazgeçilmez hale gelmektedir.

Spreyn konumlandırma teknikleri emisyon sınırlarının sürekli daraltılmasıyla motorda iyi bir yanma ve dolayısıyla iyi bir

performans için giderek daha belirleyici olmaktadır. Yanma odasında spreyn çarpma noktaları 3D modellerle hesaplanmakta, soğuk çalışma ortamları için motorun en kısa sürede çalışmasını sağlayacak biçimde, kızdırma bujisine göre spreyn konumu optimizasyonu yapılmaktadır. Emisyon sınırlarının düşürülmesiyle, zorunlu seviyelerin yakalanabilmesine yönelik olarak, spreyn geometrisi hesaplamalarında yanma odasına giren hava ve spreyn dinamik etkileri gelecekte daha fazla önem kazanacaktır.

Enjektör memesi üzerine yukarıda bahsedilenler motorun çok küçük bir parçasının, ama yanmayı ve emisyonları doğrudan etkileyen belki de en önemli parçasının, birkaç geliştirme çalışmasından örneklerdir. Gerek emisyon sınırlarının düşürülmesi yönünde gerekse otomotiv sanayide kızışan rekabet baskısıyla yakıt enjeksiyon sistemlerine yönelik çalışmalar yoğunlaşmakta ve giderek ayrıntılandırılmaktadır. Otomotiv sanayi dünya çapında yaygınlığı ve sürekli artan kullanım yoğunluğu dolayısıyla, artık herkesin bildiği şekilde en başta sayılabilecek 2-3 “kirleticiden” biri olarak görünüyor. Otomotiv sanayinin gittikçe artan araç sayısı ile birlikte yerkürenin tüm yaşam alanlarına etkisi ve beraberinde sorumluluğu da büyüyor.

KAYNAKÇA

1. Bosch Dizel Sistemleri Ürün Geliştirme Bölümü DS/EIN-Bu (Diesel Systems/Engineering Injectors and Nozzles-Bursa) Yansılar ve Geliştirme Raporları
2. Emissions-Control Technology for Diesel Engines; Robert Bosch GmbH, 2005
3. “Innovationen Dieseleinspritzdüse Chancen für Emissionen, Verbrauch und Geräusch”, B. Bonse, B. Dittus, J. Giersch, A. Kerst, T. Kügler, H. Schumacher, T. Wintrich, Robert Bosch GmbH, 3. Stuttgarter Symposium, 2003
4. “Nozzle Hole Geometry: A Powerful Instrument for Advanced Spray Design”, J. Winter, B. Dittus, A. Kerst, O. Muck, R. Schulz, A. Vogel, Robert Bosch GmbH, Thiesel 2004, Valencia, Spain, Sept. 2004
5. Mixture Formation in Internal Combustion Engines, C. Baumgarten, Springer, 2006
6. Internal Combustion Engine Fundamentals, J.B. Heywood, McGraw Hill International Editions, 1988
7. www.dieselnet.com
8. www.intranet.bosch.com