DİZEL MOTORLARI YAKIT ENJEKSİYON SİSTEMLERİNDEKİ GELİŞMELER

Mustafa ÇANAKÇI,
A. Necati ÖZSEZEN*

Dizel motorlarında yüksek basınçlı enjeksiyon teknolojisinin gelişimi ile iyi bir atomizasyon ve enjeksiyon zamanlaması sağlanabilmekte, böylece motorun geçici rejiminde oluşan egzoz emisyonları azaltılabilmektedir. Dizel motorları yakıt ekonomisi ve performans açısından önemli bir avantaja sahip iken yanma gürültüsü ve egzoz emisyonları (NOx ve PM) açısından bazı dezavantajları vardır. Bu sakıncaları ortadan kaldırmak için yapılan ek sistemlerdeki gelişmeleri bir önceki makalede dizel motorları yardımcı ekipmanlarındaki gelişmeler olarak incelenmiştir. Bu kısımda ise, dizel motorları yakıt enjeksiyon sistemlerindeki gelişmeler, sistem ve üretici bazında incelenmektedir.

Anahtar sözcükler : *Dizel motor, yakıt enjeksiyon sistemleri, dizel emisyonları, performans*

With the developments of high pressure injection technology in diesel engine, well atomization and injection timing can be provided and so exhaust emissions are decreased at transient regime. The diesel engine has an important advantage in terms of fuel economy and performance, but it has some disadvantages such as exhaust emissions (NOx and PM) and large combustion noise. The developments in auxiliary equipments of diesel engine to overcome these drawbacks have been investigated in the previous paper. In this part, the developments in the fuel injection systems of diesel engines are investigated based on manufacturers and systems.

Keywords : *Diesel engine, fuel injection systems, diesel emissions, performance*

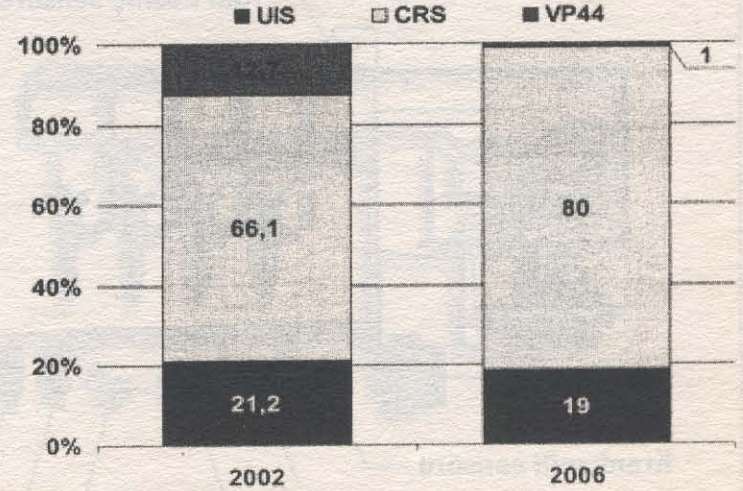
* *Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makina Eğitimi Bölümü*

GİRİŞ

Yıllardır, tüketicilerin farklı isteklerinin çeşitliliği, dizel yakıt enjeksiyon sisteminde de çeşitliliğin artmasına yol açmıştır. Dizel motor teknolojisindeki birçok önemli gelişme, güçte artış, yakıt tüketimi, motor gürültüsü ve egzoz emisyonlarında azalış sağlamıştır. Common rail yakıt enjeksiyon sistemi, kamdan hareket alarak çalışan sistemlerle karşılaştırıldığında, direk enjeksiyonlu dizel motorlara enjeksiyon sisteminin adaptasyonu oldukça esneklik sağlamaktadır (1). Bu yüzden common rail yakıt enjeksiyon sistemi birkaç araç modeli dışında tüm araç üreticilerinin tercih ettiği yakıt enjeksiyon sistemi haline gelmiştir.

Geleceğin dizel püskürtme sistemi olarak tanımlanan Common rail yakıt enjeksiyon sistemi, özellikle Avrupa'da gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Yakın gelecekte Türkiye'de de çok sayıda dizel aracın, bu sistemle donatılacağı düşünülmektedir. Şekil 1'de bir firmanın araştırmasına göre dizel motorlu araçlarda kullanılan ve kullanılması tahmin edilen yakıt enjeksiyon sistemleri görülmektedir.

Şekil 1'de de gösterildiği gibi 2006 yılında tüm dizel motorlu araçların



UIS: Birim enjektör sistemi
CRS: Common rail sistemi
VP44: Geliştirilmiş distribütör tipi pompa sistemi

Şekil 1. *Bir firmanın Araştırmasına Göre Günümüz ve Gelecek Yakıt Enjeksiyon Sistemlerinin Dağılımı (2)*

%80'ninde common rail yakıt enjeksiyon sisteminin kullanılacağı tahmin edilmektedir. Yakıt enjeksiyon sistem üreticileri common rail yakıt enjeksiyon sistemi üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmalarını sürdürmektedir.

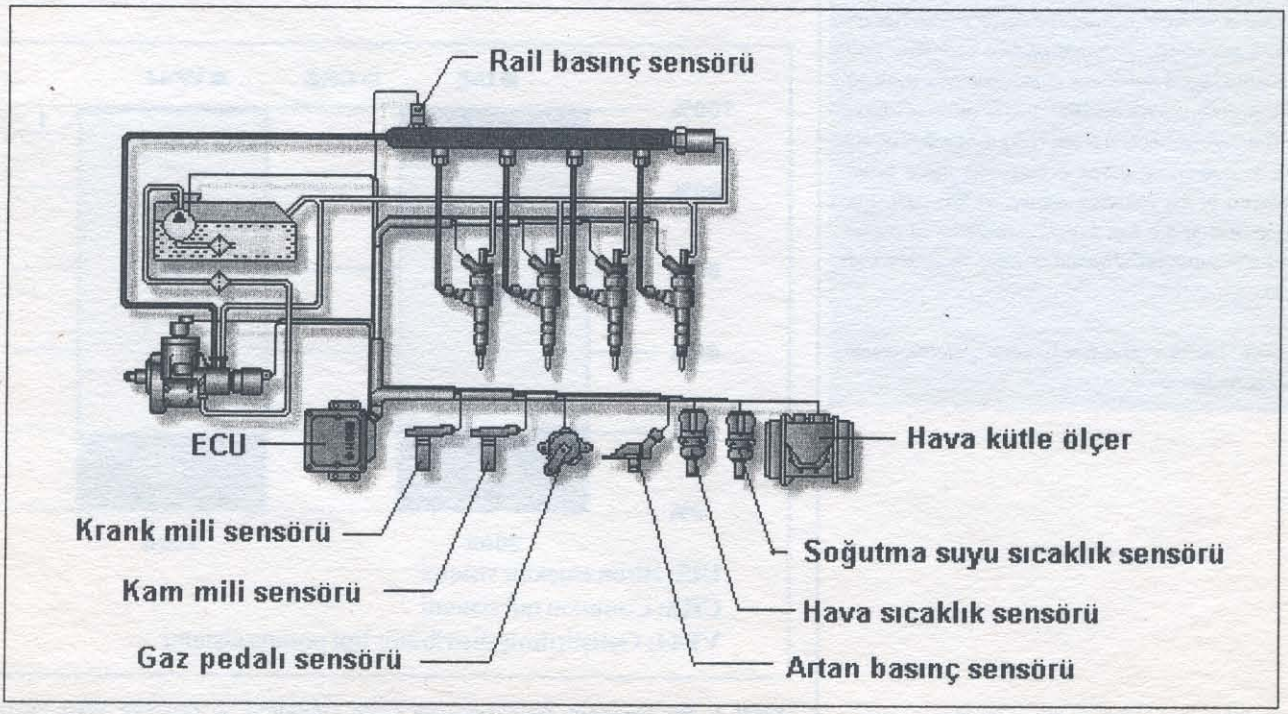
YAKIT ENJEKSİYON SİSTEMLERİNDEKİ GELİŞMELER

Common rail, direk enjeksiyonlu dizel motorlara kolay adaptasyonu ve yüksek verimleri nedeniyle yüksek oranda dizel araçlarda kullanılmaya başlamıştır. Aynı zamanda common rail, enjeksiyon basıncının yüksek olması ve kontrol mekanizmasının esnekliği ile de dikkatleri üzerine çekmiştir. Dizel elektronik sistemlerinde kullanılan solenoid valftaki gelişmeler, enjeksiyon zamanlamasının daha hassas olmasını sağlamış ve böylece yanma verimi artmıştır. Common rail sisteminin oluşumu solenoid enjektör teknolojisi ile gerçekleşmiştir (3). Şekil 2'de temel elemanları ile common rail sistemi gösterilmektedir.

Common rail enjeksiyon sisteminde enjeksiyon basıncı, motor hızı ve enjekte edilecek yakıt miktarı birbirinden bağımsız olarak çalışır. Püskürtmeye hazır durumdaki yakıt, basınç altında rail'de depo edilir. Motorun hız ve yük şartları sürücü tarafından tanımlanırken, enjeksiyon başlangıcı ve enjeksiyon süresi ECU tarafından hesaplanarak solenoid tetiklenir.

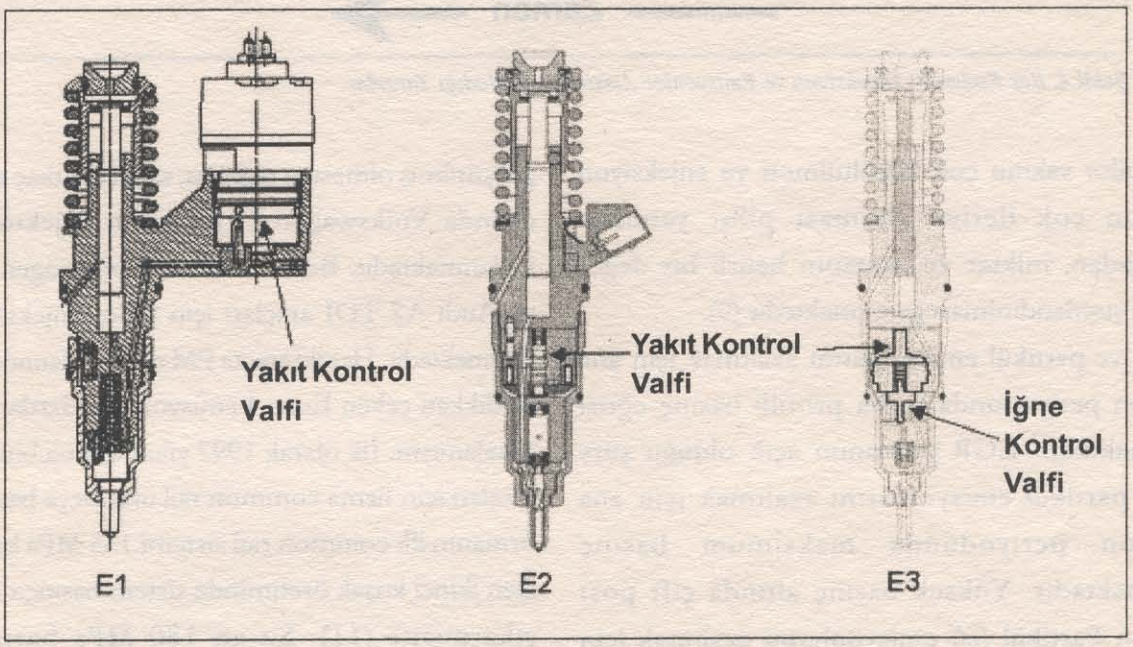
Günümüzde solenoid kontrollü common rail yakıt enjeksiyon sisteminin yerini piezo tetikleyici common rail sistemi almaya başlamıştır. Piezo kristalinin karşılıklı iki yüzüne mekanik basınç veya titreşim uygulandığı zaman, diğer iki yüzeyi arasında bir elektriksel gerilim farkı elde edilir. Elektrik kristale iletildiği zaman kristal kafesi birkaç mili saniye içerisinde genişler. Malzeme deşarj olduğu zaman orijinal boyutlarına geri döner. Bu özellik piezo etki olarak bilinir. Bu özelliği ile basınç ve titreşim gibi mekanik büyüklüklerin ölçümünde kullanılmaktadır. Piezo-elektrik tetikleyiciler, kristallerin bu davranışını kullanan anahtar elemanlardır (5). Enjektör üreticileri piezo elektriğin bu karakteristiklerini kullanarak enjeksiyon valflerindeki yakıt akışı kontrol edilebilmektedir. Piezo common rail sistemi ile yanma çevrimi boyunca yakıtı birkaç kademede püskürtülebilmektedir.

Birim enjeksiyon sistemleri fikri dizel motorları kadar



Şekil 2. Temel Elemanları ile Common Rail Enjeksiyon Sistemi (4)

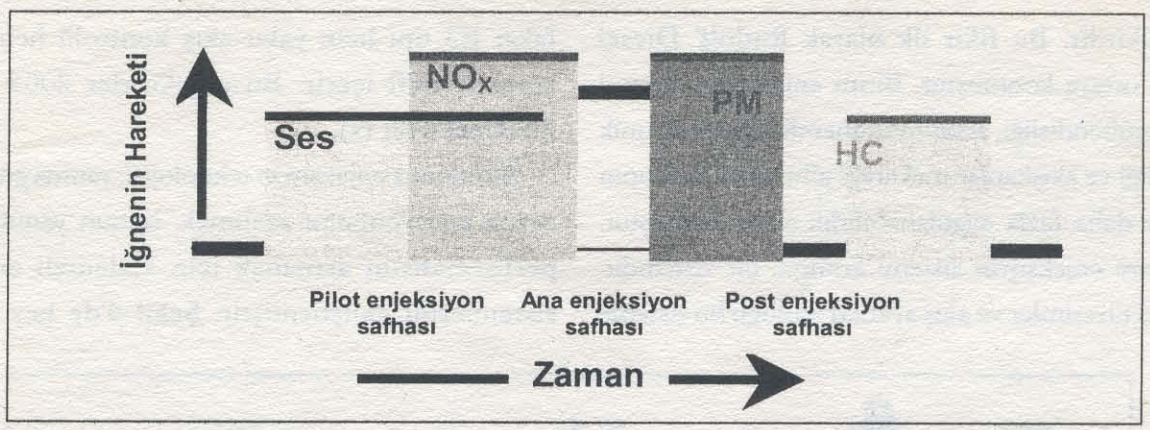
eski bir fikirdir. Bu fikir ilk olarak Rudolf Diesel tarafından ortaya konmuştur. Birim enjeksiyon sistemi malzeme mühendisliği, tasarım mühendisliği, elektronik mühendisliği ve akışkanlar mekaniği gibi bilim dallarının gelişimi ile daha fazla uygulanabilirlik alanı bulmuştur. Çünkü birim enjeksiyon sistemi komple bir sistemdir. Mekaniksel titreşimler ve akış ayarları zorluğu bu sisteme yıllarca olumsuz gözüyle bakılmasına yol açmıştır. Günümüzde unit enjeksiyon sistemi 2050 bar'lık basıncı ile daha kullanılır hale gelmiştir (6). Şekil 3'de ağır dizel araçları için üç kuşak birim enjektör bir arada gösterilmektedir.



Şekil 3. Birim Enjektörlerin Evrimi

E1 tipi birim enjektör, enjektör gövdesinin bir kenarına monte edilmiş elektronik kontrollü (solenoid) yakıt kontrol valf ile, tek bir tahrik sistemine sahiptir. Bu enjektör sistemi 1998 den beri üretilmektedir. E2 tipi birim enjektörde, elektronik yakıt kontrol valfi enjektör gövdesinin merkezine monte edilmesiyle tek bir tahrik sistemine sahiptir. Bu daha kısa yüksek basınç hattı, daha küçük yüksek basınç haznesi ve daha hafif olması ile daha kompakt bir dizayn vermektedir. E2 tipi birim enjektörler 2001'den beri üretilmektedir. E3 tipi birim enjektör ise iki adet tahrik elemanına sahiptir. E3 tipi ile E2 tipi birim enjektörle aynı dizayna sahiptir, fakat E3 tipi hem yakıt akış kontrolü hem de iğne kontrol valfi içerir. Bu enjektörler 2002 den beri üretilmektedir (7).

Günümüz enjeksiyon teknolojisi, yanma gürültüsü ve egzoz emisyonlarını azaltmak, bunun yanında motor performansını artırmak için kademeli enjeksiyon sistemlerini geliştirmiştir. Şekil 4'de beş kademeli enjeksiyon ve emisyonlar açısından sağladığı yararlar gösterilmektedir. Dizel motorlarındaki yüksek basınç, silindirler içerisinde sıcaklığın hızlı bir şekilde artmasına ve buna bağlı olarak NO_x emisyonlarının artmasına neden olur. Bu durumu ortadan kaldırmak için pilot enjeksiyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, silindire önce az miktarda (~0,5-1,5 mm^3) yakıt püskürtülür ve püskürtülen bu yakıt hemen yanarak yanma odasının ısınmasını sağlamaktadır. Böylece esas yanmaya yönelik ideal şartlar oluşturulmuş olmaktadır (8). Gelişmekte olan pilot enjeksiyon teknolojisi, düşük yük bölgelerindeki hidrokarbon emisyonlarını, NO_x emisyonlarını ve yanmadan kaynaklanan gürültü kirliliğini azaltmaktadır. Yanma gürültüsü ve emisyon oranlarının kendiliğinden azalması, pilot yanmış gazların etkisinin azalması, pilot enjeksiyon zamanının daha ileriye alınması ve pilot yakıtın minimize edilmesi ile mümkün olmaktadır. Bununla



Şekil 4. Beş Kademeli Enjeksiyon ve Emisyonlar Açısından Sağladığı Yararlar

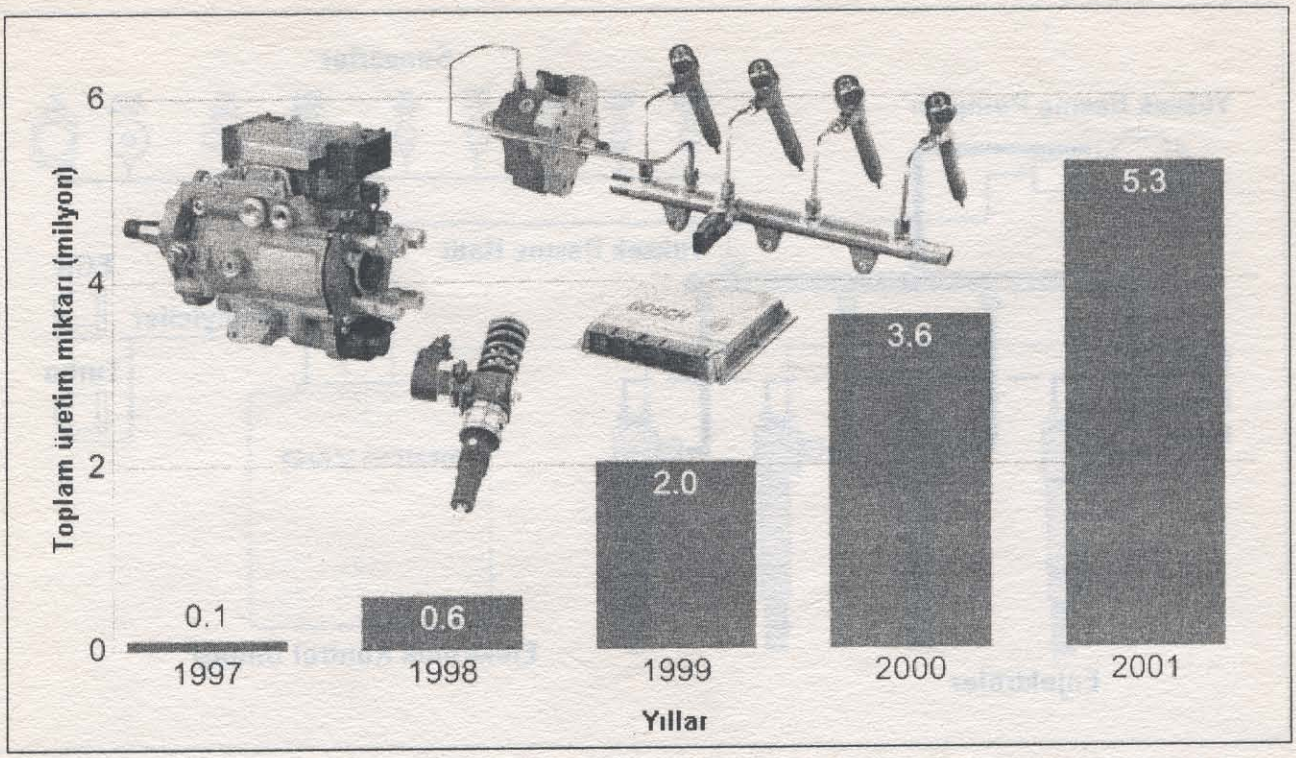
birlikte, pilot yakıtın çok küçültülmesi ve enjeksiyon zamanının çok ileriye alınması pilot yanmayı bozacağından, miktar ve zamanın belirli bir değer aralığında sınırlandırılması gerekmektedir (9).

NO_x ve partikül emisyonlarını azaltmak için ana enjeksiyon periyodunda torba profilli basınç eğrisi kullanılmaktadır. EGR portunun açık olduğu süre zarfında partikül emisyonlarını azaltmak için ana enjeksiyon periyodunda maksimum basınç kullanılmaktadır. Yüksek basınç altında çift post enjeksiyon Partikül (is) emisyonlarını azaltmak için uygulanmaktadır. Motorun bazı çalışma şartlarında egzoz gaz sıcaklığı çok düşük olduğundan partikül filtresinin ve katalizörün çalışma sıcaklığına getirilmesi mümkün değildir. Motorun tüm çalışma şartlarında katalizör ve partikül filtresinin çalışma sıcaklığına getirilmesi ikinci post enjeksiyon işlemi ile gerçekleşmektedir. Böylece katalizör ve partikül filtresi sürekli çalışma sıcaklığında tutulmuş olur. Yağlama yağının seyrelmesini önlemek için ikinci post enjeksiyonun düşük basınçlarda gerçekleşmesi tercih edilir (10).

YAKIT ENJEKSİYON SİSTEMİ ÜRETİCİLERİNDEKİ GELİŞMELER

Dizel motor endüstrisinin genelinde common rail enjeksiyon sisteminin avantajları kabul görmüştür. Birim enjektörün yüksek basınç üretimi ve tork karakteristikleri geliştirilmiş olmasına rağmen, sadece birkaç araç üreticisi dışında Volkswagen Grup birim enjektör sistemini kullanmaktadır. Bosch Firması Volkswagen Lupo TDI ve Audi A2 TDI araçları için birim enjeksiyon sistemi üretmektedir. Her iki araçta PM emisyonlarındaki sınırlama ile dikkati çeken Euro 4 emisyon standartlarının yarısını yakalamıştır. İlk olarak 1997 yılında, bazı binek tipi dizel araçları için firma common rail üretmeye başlamıştır. Bu firmanın ilk common rail sistemi 135 MPa basınca sahip iken ikinci kuşak üretiminde sistem basıncını 160 MPa'a çıkarmıştır (11). Şu an 180 MPa basınca doğru gitmektedir. Bu firmanın birim enjeksiyon sistemi, yakıtı 200 MPa'nın üzerinde bir basınçla yanma odasına püskürtmektedir. Sistemin solenoid valfi, motorun çalışma şartlarına göre gerekli yakıt oranını ayarlamaktadır. Bu firma 2000 yılında toplam 3,6 milyon common rail ve birim enjeksiyon sistemi üretirken, 2001 yılında bu rakam toplam 5,3 milyon olmuştur. Şekil 5'de enjeksiyon üreticisi bir firmanın ürettiği toplam common rail ve birim sistem üretimi gösterilmektedir.

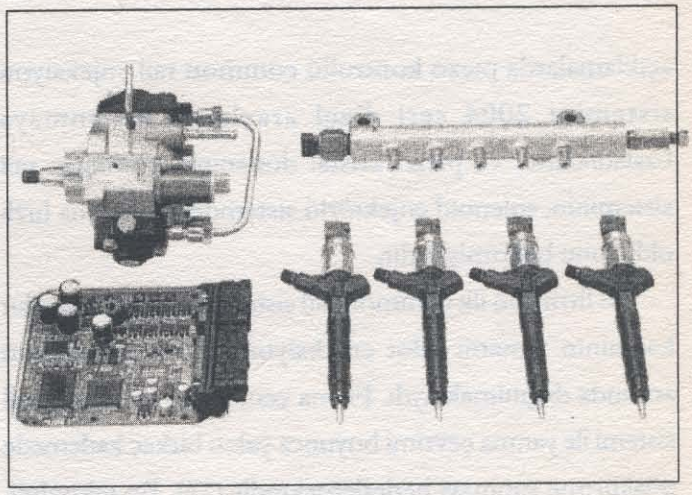
Firma ilk olarak 1997 yılında binek tipi dizel araçlar için common rail üretmeye başlar iken bir başka firma 1995 yılında ağır dizel araçlar için common rail üretmiştir. Avrupa'da kullanılan birçok ağır dizel araçta bu firmanın common rail yakıt enjeksiyon sistemi kullanılmaktadır. Günümüzde bu firmanın common rail sistemi yanmayı daha iyi kontrol edebilmek ve emisyon oranlarını iyileştirmek için beş kademeli püskürtme yapmaktadır. Bu sistemde, hava yakıt karışımını daha homojen hale



Şekil 5. Enjeksiyon Üreticisi Bir Firmanın Ürettiği Toplam Common Rail ve Birim Sistem

getirmek ve ana enjeksiyon fazındaki tutuşma gecikmesini kısaltmak için iki pilot enjeksiyon kullanılır. İki kademeli pilot enjeksiyon NO_x emisyonlarını, gürültüyü ve titreşimi azaltır. Daha sonraki post enjeksiyon fazı egzoz gaz sıcaklıklarını belirleyerek katalik egzoz sisteminin veriminin artmasına yardımcı olur. Firma yetkilileri, bu üretimleriyle partikül filtresiz Euro 4 emisyon standartlarını rahatça yakaladıklarını açıklamışlardır. Firmanın sistemi yanma sonrası emisyon kontrolü için partikül filtresi, NO_x emisyonunu kontrol etmek için egzoz basıncını ve sıcaklığını belirleyen sensörler kullanır (12). Sistemin partikül filtresi, mikro delikli ve gözenekli seramik malzemeden yapıldığından egzoz gazındaki partikül emisyonlarını toplamaktadır.

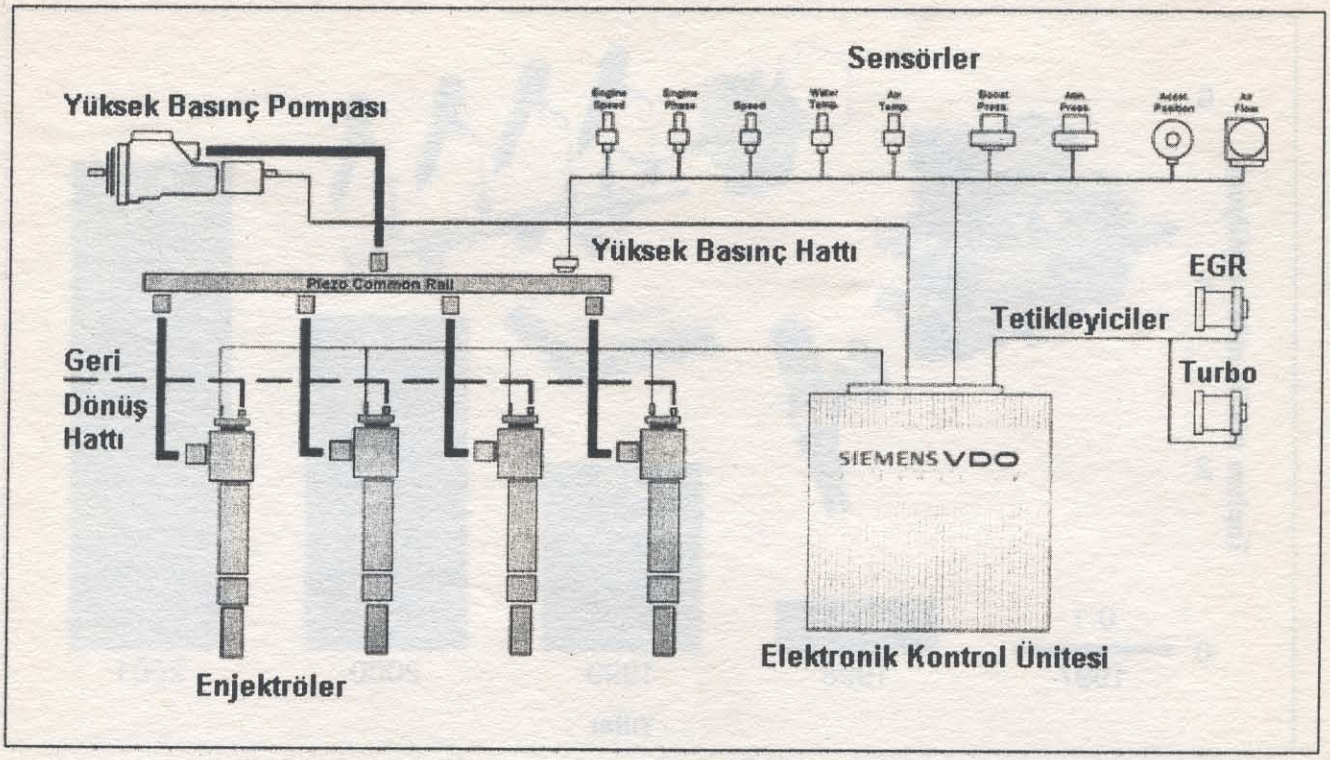
Bu firma, 135 MPa enjeksiyon basınçlı common rail sistemini geliştirerek, 2002 yılında Avrupa'da 180 MPa basınca sahip common rail sistemi üretmeye başlamıştır. Şekil 6'da bir yakıt enjeksiyon üreticisi firmanın üretimini yaptığı 180 MPa'lık common rail sistemi gösterilmektedir. Firma yetkilileri 2005 yılında 180 MPa'lık common rail sistemleri için piezo enjektörler



Şekil 6. Bir Yakıt Enjeksiyon Üreticisi Firmanın Üretimini Yaptığı 180 MPa'lık Common Rail Sistemi (13)

üretmeyi planlamaktadır. Aynı zamanda firma, sistemdeki ana enjeksiyon süresinin başlangıcı ile pilot enjeksiyon süresinin bitimi arasındaki 4 ms'lik süreyi 1 ms'ye düşürmeyi hedeflemektedir. Bu durumdaki en büyük etken piezo kontrollü enjektörlerdir.

Diğer taraftan bir başka yakıt enjeksiyon sistemi üreticisi firma piezo enjektörlü common rail siteminin üretimine başlamıştır. Firma yetkilileri yaptıkları



Şekil 7. Bir Yakıt Enjeksiyon Üreticisi Firmanın 24'üncü Vienne Motor Sempozyumunda Tanıtımını Yaptığı Üçüncü Kuşak Piezo Common Rail Yakıt Enjeksiyon Sistemi (14)

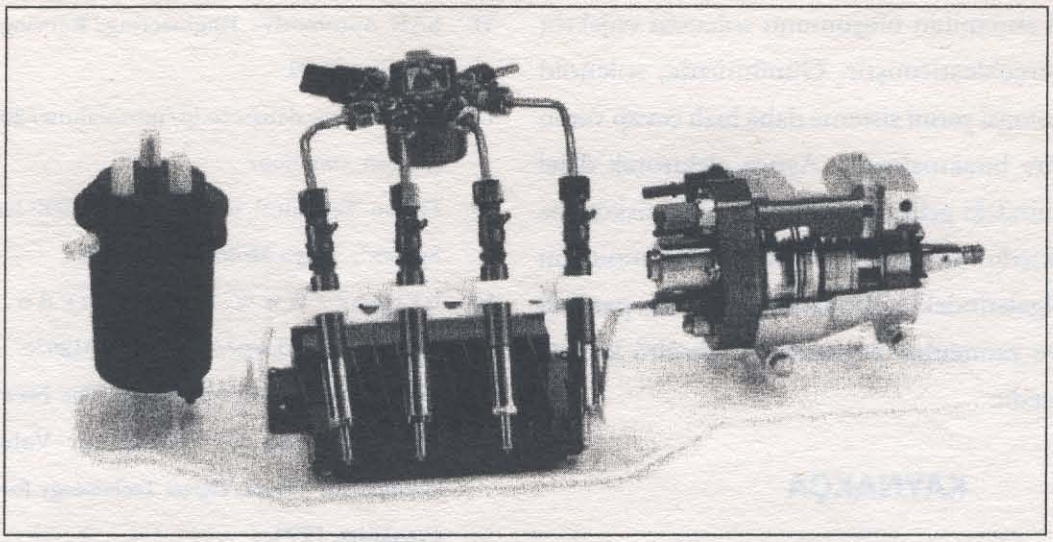
açıklamalarda piezo kontrollü common rail enjeksiyon sistemini 2004 seri dizel araçlarda kullanmaya başladıklarını ve piezo kristal donanımlı common rail sisteminin, solenoid enjektörlü sistemden çok daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir.

Bu firmanın ilk common rail sisteminde enjektör yakıt hacminin tamamı pilot enjeksiyon ile ana enjeksiyon arasında dağıtılmaktaydı. Firma yeni piezo common rail sistemi ile yanma çevrimi boyunca yakıtı birkaç kademede püskürtme yapmayı hedeflemektedir (15). Bu teknoloji, yakıtı çok küçük miktarlarda püskürten iki ayrı pilot enjeksiyon, bu enjeksiyonları takip eden ana enjeksiyon ve daha sonra yine çok küçük miktarlarda yakıt püskürten iki ayrı post enjeksiyondan oluşur. Daha öncede belirtildiği gibi sistemindeki pilot enjeksiyon, yanma sırasında oluşan basıncın, silindirde düzgün dağılımına yardımcı olarak ses emisyonlarının azalmasını sağlar. Sistemdeki post enjeksiyon ise HC ve PM emisyonlarının azalmasına yardımcı olur. Sisteminin enjektör delik çapı 0,12mm, toleransı 0,003 mm'den daha küçüktür. Hacim kontrollü yüksek basınç pompası yaklaşık %95 verime sahiptir. Sistemin elektronik kontrol ünitesi 16 bit olup araca monte edilmiştir. Gelecek üretimlerde ECU'nun 32 bit olması hedeflenmektedir. ECU -40 ile +85 °C arasında çalışmakta, bu aralık 105°C'ye genişletilebilmektedir (14).

Common rail sistemi bir başka yakıt enjeksiyon üreticisi firma için de önemli bir yere sahiptir. Bu firma Avrupa'daki common rail yakıt sistemleri pazarının yaklaşık olarak %20'sine sahiptir. Şekil 8'de Küresel tip common rail yakıt enjeksiyon sistemi gösterilmektedir.

Firma yetkilileri 140 MPa common rail sisteminin bir piezo sistem içermemesine rağmen piezo sistemi ile aynı hızda ve aynı hassasiyetinde çalıştığı, maliyet ve riskinin piezo sisteme göre daha az olduğu belirtilmektedir. Bu firma da 200 MPa 'lık basınca sahip piezo tetikleyicili common rail enjektörü geliştirme çabası içerisindedir.

Bu firma özellikle üç teknolojiye sahip olduğunu vurgulamaktadır. Birincisi; Pompanın kenarında basınç kontrol valfinden daha hassas bir yakıt giriş ölçüm valfi vardır. Yakıt girişi ölçüm valfi sisteme giren yakıt



Şekil 8. Küresel Tip Delphi Multec DCR (16)

basıncını ve miktarını kontrol eder, böylece yüksek basıncın gereksiz olduğu durumlarda sistem daha az enerji harcar. Ayrıca diğer firmaların common rail sistemlerinde sabit miktarda yakıt rail'e gönderilir iken bu sistemde gereken miktarda yakıt rail'e gönderilir. Diğer sistemlerde basınç kontrol valfi, artan basınçlarda kontrol valfini açarak geri dönüşüm hattıyla yakıtı tanka geri gönderir, bu yüzden bir iş kaybı meydana gelmektedir. Firmanın sistemi ise yüksek basınçlı yakıtın kontrollünde daha etkilidir. Yüksek basınçlı sıcak yakıtı, yakıt tankına yönlendirmek çok zor olduğundan yakıt girişi ölçüm valfi sisteme giren yakıtı elimine ederek sıcak yakıtı, yakıt soğutma kısmına doğru yönlendirir. İkincisi; hız ölçüm tabanlı besleme sistemidir. Bu sistemde enjektörler doğru miktarda pilot yakıt dağıtarak aracın ömrünü uzatır. Enjektörler doğru miktarda pilot yakıt dağıtamaz ise motor aşırı derecede gürültülü çalışır. Hız ölçümlü pilot kontrol bir yanma besleme sistemidir. Değişen şartlarda yanma ve enjeksiyon ayar kalitesi analiziyle motor gürültü seviyesini kontrol eder. Hız ölçümlü pilot kontrolde her bir enjektör birbirinden bağımsız hareket eder. Firma pilot enjeksiyonu kontrol etmek için solenoid enjektör teknolojisini kullanmaktadır. Her bir enjektörün içerdiği solenoid firmanın üçüncü teknolojisidir. Diğer firmalar solenoidin tetiklenmesinde yüksek voltaj kullanırken Firmanın sistemi 14 V'luk enerji kullanır. Aynı zamanda solenoidleri büyük olduğundan ince enjektör gövdesinde uygun bir dizayna sahip değildir. Bunlar bu firmanın enjektör sistemlerinin avantajıdır (17).

Firmanın 140 MPa common rail sistemi birçok binek dizel araçlarında kullanılmıştır. Firma bir dizel binek aracın da birçok sebepten dolayı küresel bir rail kullanırken, bir başka dizel binek aracında düzlemsel rail kullanmıştır (18).

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Dizel araçlardan kaynaklanan yanma gürültüsü ve egzoz emisyonlarını azaltmak, bunun yanında motor performansını iyileştirmek, enjeksiyon teknolojisinin gelişmesine paralel olarak sağlanabilmektedir. Dizel motorlu araçlar son yıllarda daha yüksek yakıt ekonomisi sağlarken, egzoz emisyonlarında da %50'ye varan azalma göstermektedir. Bu iyileşmedeki en önemli etken 1997 yılından itibaren binek dizel araçlarda kullanılmaya başlanan common rail yakıt enjeksiyon sistemidir. Dizel elektronik sistemlerinde kullanılan solenoid valfteki gelişmeler, enjeksiyon zamanlamasının daha hassas olmasını sağlamış ve böylece yanma verimi artmıştır.

Common rail sisteminin oluşumunu solenoid enjektör teknolojisi gerçekleştirmiştir. Günümüzde, solenoid enjektör teknolojisi yerini sisteme daha hızlı cevap veren piezo enjektöre bırakmaktadır. Ayrıca elektronik dizel kontrol sistemindeki gelişmeler ile kademeli püskürtme sağlanabilmektedir. Kademeli püskürtme ile motorun düşük yük bölgelerindeki hidrokarbonlar, NO_x, partikül emisyonları ve yanmadan kaynaklanan gürültü kirliliği azaltılabilmektedir.

KAYNAKÇA

1. **Russell, M.F., Greeves G. and Guerrassi, N.** "More Torque, Less Emissions and Less Noise", SAE paper, No: 2000-01-0942, 2000.
2. http://www.bosch-presse.de/TBWebDB/bosch-pbj/en-US/CategoryBrowse.cfm
3. **Yang, Q., Zhang, H., Huang, G., Zhang, Y. and Chen, C.** "A Study on the Fast Response Solenoid Valve in the Electronic Control of Diesel Engine", FISITA World Automotive Congress, Seoul, Korea, 2000.
4. Bosch Technical Instruction, "Diesel Acumulator Fuel-Injection System Common Rail", Stuttgart, 1999.
5. **Halit Pastacı,** "Elektrik ve Elektronik Ölçmeleri", Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
6. Bosch Technical Instruction, "Diesel Fuel-Injection Systems Unit Injector System and Unit Pump System", Stuttgart, 2000.
7. **Greeves, G., Tullis, S., and Barker, B.** "Advanced Two-Actuator EUI and Emission Reduction for Heavy-Duty Diesel Engines", SAE Paper, No: 2003-01-0698, 2003.
8. **Stockner, A. R., Flinn, M. A. and Camplin, F. A.** "A New Direction for Diesel Engine Fuel System", SAE paper, No: 930270, 1993.
9. **Tanakaa, T., Andoa, A. and Kazuyoshi Ishizakab, K.** "Study on Pilot Injection of DI Diesel Engine Using Common-Rail Injection System", JSAE Paper, Vol.22, Sf: 297-302, 2002.
10. **Mahr, B.** "Future and Potential of Diesel injection Systems", Conference on TFDP in Diesel Engines, Sf: 5-17, 2002.
11. SAE Automotive Engineering,"Revving up for Diesel", February, 2002.
12. http://www.denso.co.jp/motorshow/2003/en/presskit/product_common/
13. Denso Technical Instruction, "1,800-bar Common Rail System", Tokyo Motor Show, 2002.
14. http://www.siemensvdo.com/com/pressarticle2003.asp?ArticleID=031203e
15. Siemens Automotive Systems, "The New Diesel Specialist Piezohydraulics Get Ready for Volume Production Commercial Vehicle Diesel Technology for North America", Frankfurt, 1999.
16. **Jean Botti,** "Advanced Engine Management and Emission technology", Delphi Publication, 2003.
17. Delphi Tech nical Instruction, "Delphi Diesel Common Rail (DCR) System", Delphi Publication, 2003.
18. http://www.delphidieselsystems.com/diesel/uk/news.asp

DAHA ETKİN
BİR ODA İÇİN
ÜYELİK
ÖDENTİLERİMİZİ
ZAMANINDA
ÖDEYELİM