



Research Article / Araştırma Makalesi

**DESIGN OF A DIESEL ENGINE CONTROL SYSTEM TO CHANGE THE NUMBER OF INJECTION AND THE EFFECTS OF MULTI PHASE INJECTION ON NOX EMISSION LEVELS AND THE PERFORMANCE**

**Alp Tekin ERGENÇ\*, Ali Fuat ERGENÇ, Burak OLGUN, Fatih RAVALI**

*Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL*

Received/Geliş: 15.10.2015 Accepted/Kabul: 07.12.2015

**ABSTRACT**

Improvements of combustion in diesel engines are directly related to the combustion of the mixture formation. Mixture formation in diesel engines is provided with pulverizing the fuel and mixing with the air in the cylinder, thus good combustion occurs. In addition, the combustion process and mixture of formation are affected by injection system parameters such as start and finish timing of the injection, injection duration, injection pressure, injection beam and number...etc. In this context, given the importance of mixture formation in fuel injection systems, an engine that controls the fuel feed can be used in alternative fuels and emission treatment studies.

The fuel injection duration determines the start time of combustion as crank angle and also affects the status change of the intake air and the change of ignition delay time of the combustion. The injection of the fuel quantity and duration can be controlled more effectively and liberally with the common rail injection system than using mechanical injection pump in diesel engines. In the common rail injection system the timing and duration of the current applied to the injectors determined by a controller using processed the data received from a variety of sensors and to optimize the operating point.

Taking into consideration the sooty running of diesel engines caused by excessive fuel and an increase in NOx emissions by high temperature inside the cylinder, the effects of these parameters on NOx by changing the preliminary injection and injection characteristics on the injected fuel into the cylinder will be discussed in this study.

**Keywords:** Diesel engine, NOx, injection, advance, plc.

**PÜSKÜRTME FAZ ADEDİ DEĞİŞİMİNİN PERFORMANS VE NOx EMİSYON SEVİYELERİNİN SEYRİNE ETKİLERİ İLE BU ETKİLERİN GÖZLENEBİLMESİ İÇİN DİSEL MOTOR YÖNETİM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

**ÖZ**

Diesel motorlarında karışımın teşkili; yakıtın zerrelere ayrılarak, silindirdeki hava ile iyi bir yanma sağlayacak şekilde karışması ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte, püskürtmenin başlangıcı-bitişi, püskürtme süresi, püskürtme basıncı, püskürtme demeti sayısı gibi püskürtme sistemi parametreleri yanma prosesini ve karışım oluşumunu etkilemektedir. Bu bağlamda yakıt püskürtme sistemlerinin karışım teşkilindeki önemi de göz önüne alındığında, alternatif yakıt çalışmaları ve emisyon iyileştirme çalışmalarında ancak yakıt sevkinin kontrol edilebildiği bir motor kullanılabilir.

Yakıt püskürtme süresi krank açısı olarak yanmanın başlama zamanını belirler. Yakıt püskürtme süresi, içeri alınan havanın durumunun değişimini ve tutuşma gecikmesi süresinin değişimini etkilemektedir. Elektronik kontrollü püskürtme sistemlerinde kullanılan kontrolör, çeşitli sensörlerden gelen verileri işleyerek, enjektörlere uygulanacak olan akımın süresi ile zamanlamasını kontrol eder ve optimum çalışma noktasını belirler. Bir Diesel motorda isli yanma yüksek yakıt sevkinden meydana gelirken, yüksek sıcaklık NOx emisyonu artışını tetiklemektedir. Bu noktadan hareketle fazla püskürtmenin NOx emisyonunu üzerine etkileri bu çalışmada tartışılmaktadır.

**Anahtar Sözcükler:** Diesel motor, NOx, püskürtme, avans, plc.

\* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: aergenc@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 28 35

## 1. GİRİŞ

Püskürtme zamanı değişiminin DI Diesel motorlarında NOx emisyonları üzerinde önemli etkisi vardır. Bu etki IDI Diesel motorlarında nispeten daha azdır. DI motorlarında, yüksek yüklerde özgül HC emisyonları düşük ve püskürtme zamanı ile çok az değişim göstermektedir. Düşük yüklerde HC emisyonları daha yüksek ve püskürtme süresinin optimumundan gecikmesi ile artmaktadır. Bu durum özellikle rölantide gerçekleşmektedir. IDI motorlarında HC emisyonları aynı trendi göstermektedir. Ancak DI motorlarından daha düşük değerler almaktadır. (Greeves, 1977,1979) Püskürtme zamanındaki gecikme genelde isi artırmaktadır. Bu eğilim Diesel motorun tipi ve dizaynına göre değişim göstermektedir. Bununla birlikte partikül emisyonları da artan gecikme ile artmaktadır. Uchida vd. (1992) yaptığı çalışmada püskürtme avansı artışı ile NOx emisyonlarında artış partikül emisyonlarında azalma, bununla birlikte HC emisyonlarında artış, is miktarında ise önce artan sonra azalan bir eğilim gözlemişlerdir. Desantes vd.(2004) yaptıkları çalışmada, direkt püskürtmeli Diesel motorunda püskürtme basıncı ve püskürtme zamanının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deney yapılan motorda püskürtme avansı ÜÖN dan önce ve sonra olmak üzere değişik değerlere ayarlanmıştır. Bununla birlikte çalışmada da genel literatüre uygun olarak artan püskürtme avansı ile birlikte NOx emisyonlarında artış, kuru is emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi değerinde de artan püskürtme avansında, artışa paralel azalma görülmüştür. Huang vd. (2004) metanol-motorin karışımlarını bir diesel motorunda yakıt olarak denemişlerdir. Bu çalışma esnasında karışımın püskürtme avansı değiştirilerek karışımın davranışı gözlenmiştir. Biodiesel yakıtlarda methanol kullanıldığı düşünüldüğünde, bu çalışma özellikle yoğun alkol içerikli esterlerin etkisinin gözlenmesinde referans olabilecektir. Çalışmada, methanol miktarının artırılması ile ön yanma fazının ısı açığa çıkış hızı nın arttığı, difüzyonlu fazda yanma gecikmesinin kısıldığı görülmüştür. Motorin ve metanol karışımları için, artan yakıt sevk avansı, tutuşma gecikmesini artırmaktadır. Yüksek hız, düşük motor yükünde, artan metanol(oksijen oranı artmaktadır) ilavesi tutuşma gecikmesini artırmaktadır. Bununla birlikte hızlı yanma süresi ve toplam yanma süresi, yakıt sevk avansının artması ile artmaktadır. Diğer taraftan artan sevk avansı, silindir içi basıncın artışına neden olmaktadır. Ayrıca motorin-metanol karışımları saf motorine göre daha yüksek silindir içi basınç değerleri göstermiştir. Diesel motorlarda püskürtme basıncının, motor performansı ve emisyonu üzerinde önemli etkiler vardır. Bu nedenle motor üreticileri püskürtme basıncını arttırılabilmek için yoğun arge çalışmaları yapmaktadırlar. 100 bar mertebelerinden başlayan basınç değerleri günümüzde kullanılan ortak hat püskürtme sistemlerinde 2200 bar mertebesine yükselmiştir. Yükselen basınç Diesel motorunda yüksek devirlerde çalışma imkanı doğurmakta, bu durum otomobillerde kullanılan taşıt motorlarında performans yönünden konforu arttırmaktadır. Çelikten (2003) yaptığı çalışmada 100–250 bar arası değişken basınç şartında farklı gaz pozisyonunda performans çalışması yapmıştır. Bu çalışmada maksimum performans 150 bar'da elde edilmiştir. O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında yüksek basınç değerlerinde düşüş, NOx emisyonlarında ise düşük basınç değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Çınar vd. (2005) indirekt püskürtmeli 4 stroklu 4 silindirli Diesel motorunda yaptıkları çalışmada artan basıncın torkta düşüşe neden olduğunu gözlemişlerdir. Güç üzerine etki incelendiğinde düşük püskürtme basınçlarının, güçte çok değişime neden olmadığını, buna rağmen artan püskürtme basıncının gücü düşürdüğünü, özgül yakıt sarfiyatını artırdığı gözlemişlerdir. Reddy ve Ramesh (2006) tek silindirli direkt püskürtmeli motorda yaptıkları çalışmada yüksek püskürtme basıncının atomizasyonu arttırdığını bu durumun krank açısı başına ısı açığa çıkışını arttırdığını, bununla birlikte artan püskürtme basıncının performansı ve emisyonları iyileştirdiğini gözlemişlerdir. Sekmen vd. (2004) 4 zamanlı tek silindirli ve direkt püskürtmeli bir Diesel motorunda püskürtme basıncı ve maksimum yakıt miktarının performans ve duman emisyonlarına etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada enjeksiyon basıncının artması ile birlikte belli değere kadar motor momenti ve gücünde artış gözlenmiş ancak değer daha fazla artırıldığında bu durum terse döndüğü gözlenmiştir. Bu durum artan

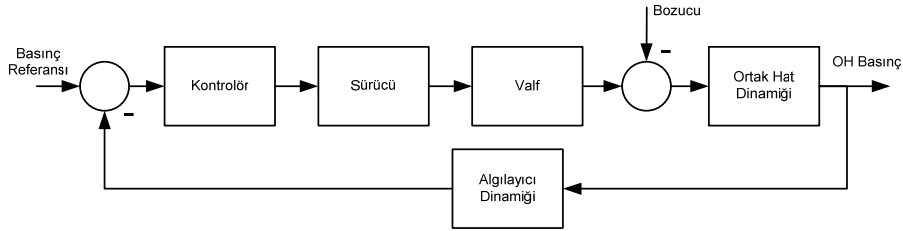
enjeksiyon basıncı ile belirli bir değere kadar damlacık çapı küçülmesi ve yanma hızının artışı ile açıklanmaktadır. Ancak basıncının çok artmasının damlacık çapının küçülttüğü, nüfuz derinliğini azalttığı, görüşü ile de gücte ve momente düşüşü izah etmektedirler. Bununla birlikte, belirli bir noktaya kadar artan basınçta duman koyuluğunun azaldığı, ancak artışın devamı ile birlikte bu durumun terse döndüğü gözlenmiştir. Salman ve Topgül (2001) tek silindri, direkt püskürtmeli bir diesel motorunda enjeksiyon basıncının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Deneylerde basınç 20 MPa ile 35 MPa arası değiştirilmiştir. Bu çalışmada 30 MPa' a kadara artan basınç pozitif etkise de 30 MPa üstü basınç değerlerinde, efektif güce dönüşen ısı oranının azaldığı ve soğutma suyu ile egzoz gazlarına geçen ısı kayıplarının arttığı anlaşılmıştır. Artan enjeksiyon basıncının yakıt damlacıklarını küçülttüğü, ataletini azalttığı ve yakıtın yanma odasında nüfuz derinliğini azalttığı sonucuna varılmıştır. Miyamoto vd.(1994) yaptıkları çalışmada direkt püskürtmeli kademeli dolgulu iki fazlı püskürtmeli bir sistem tasarlamışlardır. Bu çalışmada geniş piston çapına sahip tek silindri bir diesel motoru tek silindri bir buji ateşlemeli motora dönüştürülmüştür. Yakıt olarak benzin ve benzin-motorin karışımları yakıt olarak kullanılmıştır. Çalışmada yakıt iki fazda silindire püskürtülmüştür. Birinci faz düzgün dağılmış fakir bir ön karışım elde etmek için kompresyon strokundan önce, ikinci faz ise iyi bir yanma elde edebilmek için sıkıştırma sonunda yapılmaktadır. İki fazlı püskürtme motorda yanmayı daha verimli hale getirmiş ve özgül yakıt tüketimlerinde ve özellikle NOx emisyonlarında azalma gözlenmiştir. Ghaffarpour ve Baranescu (1996) yaptıkları çalışmada püskürtme oranı ve hava soğutucusu kullanımının NOx emisyonlarına etkisini araştırmışlardır. Rölanti konumunda 1 Kma fark ile %10 pilot, %90 ana püskürtme yapılmasının minimum NOx emisyonu oluşturduğunu saptamışlardır. Yüksek hız , orta yükte de püskürtme oranı değişiminin olumlu etki yaptığını ancak yüksek hız ve yükte çok etkili olmadığı sonuçlarına varmışlardır. Hideyuki vd.(2000) yaptıkları çalışmada direkt püskürtmeli bir diesel motor kullanmışlardır. Kullanılan motora ortak hat püskürtme sistemi monte edilmiş olup, püskürtme zamanlaması isteğe bağlı değiştirilebilmektedir. Çalışmada yakıt pilot ve ana püskürtme olarak iki fazda silindire püskürtülmüştür. Pilot püskürtme diesel motorunda egzoz gaz emisyonlarının azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bu ön püskürtme özellikle NOx emisyonlarında ve motor gürültüsünde azalma ya neden olmaktadır (Yokoto,1997).Papagiannakis vd. (2007) yaptıkları çalışmada direkt püskürtmeli tek silindri bir diesel motorunda pilot yakıt olarak doğalgaz kullanmış ve bu pilot yakıtın miktarı ile püskürtme zamanında değişiklik yapmışlardır. Bu çalışmada püskürtme zamanı ile birlikte püskürtülen yakıt miktarında artırılması, motor veriminde artışa, CO emisyonlarında düşüşe ve NO emisyonlarında artışa neden olmuştur. Benajes, Garcia-Oliver, Novella ve Kolodziej (2012) çalışmalarında düşük sıcaklık yanması (LTC) olarak tanımladıkları temiz ön karışimli diesel yanma stratejisini kullanmışlardır. Egzoz gaz resirkülasyonunu çok küçük Nox emisyonları, ileri yakıt enjeksiyon zamanlamasının partikül madde emisyonlarını azaltmak için kullanmışlardır. Enjeksiyon zamanlamasında ki küçük değişikliklerin partikül madde kütlesinde ciddi değişimleri meydana getirdiğini elde etmişlerdir. Agorwal, Srivastova, Dhar, Maurya, Shukla, Singh (2013) tek silindir deney motoru kullanarak yaptıkları çalışmalarında yakıt enjeksiyon parametrelerinin ve enjeksiyon zamanlamasının yanma, performans ve emisyon karakteristikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Tüm yüklerde motor, düşük yakıt enjeksiyon parametrelerinde çok iyi bir performans göstermiştir. Daha düşük CO<sub>2</sub>, CO, HC ve Nox emisyonları düşük enjeksiyon parametrelerinde gözlenmiştir. Ma, Zheng, Liu ve Yao(2013) çift yakıt kullanılabilir şekilde modifiye edilen tek silindri bir diesel motoru diesel ve benzin ile doldurarak yaptıkları çalışmalarında, diesel enjeksiyon stratejilerinin yanma, emisyon, yakıt ekonomisi ve çalışma üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, bu stratejinin yüksek benzin oranlı erken enjeksiyon zamanlaması kullanımında sifıra yakın Nox ve is emisyonları ile yüksek verim elde edildiğini göstermektedir. Herfatamanesh, Lu, Attar ve Zhao yaptıkları çalışmada iki aşamalı yakıt enjeksiyonu kullanılarak yakıt enjeksiyon ekipmanlarının karakterizasyonu ve optimizasyonunun diesel yanması ve emisyonları üzerine etkilerini görmeyi amaçlamışlardır. Sonuçlar 2 aşamalı enjeksiyonun NOx ve is emisyonlarının

eşzamanlı olarak azaltma potansiyelinin olduğunu göstermektedir. Değişken 2 aşamalı enjeksiyon stratejilerinin yüksek seviyede HC emisyonlarına neden olduğu elde edilmiştir. Thurner, Edenhauer, Soltic, Schneiber, Kirchten ve Sankowski çalışmalarında ağır hizmette kullanılan diesel motorlarında farklı enjeksiyon stratejilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında pilot/ana, geç/ana ve yalnızca ana enjeksiyon stratejisi kullanılmıştır. Isı kaçağı ve detaylı kaçak analiz metodları kullanılarak farklı enjeksiyon stratejileri kullanılmıştır. Çalışma sonunda NOx emisyonları, is kütlesi ve partikül madde miktarları farklı enjeksiyon stratejilerinde karşılaştırılmıştır. Payri, Broatch, Salavert ve Martin, düşük sıkıştırma oranına sahip tek silindri diesel motorun soğuk çalışma sonrasında idle durumda çoklu enjeksiyon stratejisi kullanarak yanmanın kararlılığını ve davranışını gözlemleyebilmek adına yaptıkları çalışmalarında bu strateji kullanımının yanma kararlılığını arttırdığını ve toplam ısı kaçışının da arttığını görmüşlerdir. Jaichandar ve Annamalai yaptıkları çalışmada yakıt olarak Pongomia oil ester kullanılan dört stroklu DI diesel motorda enjeksiyon basıncının ve yanma odası geometrisinin performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Fren spesifik yakıt tüketiminde azalma, fren ısıl veriminde artma, CO, UBHC ve is yoğunluğunda ciddi şekilde azalma, NOx emisyonlarında artma gibi sonuçlara ulaşmışlardır. Pongomia'dan üretilen biodiesel yakıtının ULSD ve modifiye motorlarda alternatif olarak kullanılabilir bir yakıt olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Torregrosa, Broatch, Garcia ve Monico çalışmalarında geleneksel Diesel yanmasıyla karşılaştırıldığında 2 enjeksiyonlu (pilot ve main) PCCI yanması NOx ve is oluşumunda önemli bir düşüş sağladığını, bununla birlikte yanma gürültüsünde ciddi bir artış gözlemlemişlerdir. Daesik Kim ve Sungwook Park çalışmalarında mikrojenetik algoritma kullanarak stokiometrik diesel yanması için yakıt sarfiyatını azaltmak adına motor çalışma koşullarının optimizasyonunu yapmışlardır. Optimizasyonla birlikte çalışmalarında anlık silindir içi sıcaklığın yakıt sarfiyatı üzerinde çok büyük etkileri olduğu, art yanma fazında daha düşük oksijen mevcudiyetinin olduğunu, NOx, CO ve HC emisyonlarında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Hocine, Desmet ve Guenoun, 4 silindri 2 litrelik 110 HP gücündeki direkt enjeksiyonlu motorun yanma prosesinde ısı atımının termoyönetim özelliklerini analiz etmek için yaptıkları bu çalışmada yeni bir termodinamik yanma modeli geliştirilmiş ve termal mimariyle ilişkilendirilmiştir. Post püskürtmenin özellikle soğuk ortamlarda çalışma kolaylığını sağlaması adına termal transferi arttırdığını gözlemlemişlerdir. Pang, Kiat ve Gan yaptıkları çalışmalarında hafif görevler için kullanılan diesel motorlarda yakıt püskürtme modelinin is formasyonu ve oksidasyonu prosesine etkilerini araştırmışlardır. Is formasyonunun ve oksidasyon olaylarının püskürtülen yakıt kütlesine ve silindir içi ortalama sıcaklığa bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Labecki ve Ganippa, çalışmalarında püskürtme basıncı, püskürtme zamanı ve EGR gibi farklı çalışma parametreleri ile yakıt olarak rapeseed yağ ve bileşimi kullanılan bir motorun yanma ve emisyon performansı üzerine etkilerini araştırmış olup, enjeksiyon basıncının artışının is emisyonunu düşürdüğü fakat NOx emisyonunu geleneksel diesel ile karşılaştırıldığında arttırdığını gözlemlemişlerdir. EGR ve enjeksiyon zamanlamasının NOx ve emisyonların azalmasına neden olduğunu görmüşlerdir. Agarwal, Dhar, Srivastava, Maurya ve Singh, bu çalışmada tek silindri deney motoru kullanarak yakıt enjeksiyon stratejilerini ve yakıt püskürtme zamanlamasının başlangıcının partikül boyutu ve sayısına, yüzey alanına ve hacim konsantrasyon dağıtımına olan etkilerini motor egzoz partikül ölçücü spektrometer (EEPS) kullanarak araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, partikül boyut ve sayısının motor yükü arttıkça arttığını ve yakıt enjeksiyon basıncının artışıyla düştüğünü gözlemlemişlerdir. Pandian, Sivapirakasam ve Udayakumar yaptıkları bu çalışmada enjeksiyon basıncı, enjeksiyon zamanlaması ve nozul tipi gibi enjeksiyon parametrelerinin, çift silindri su soğutmalı doğal emişli bir CIDI motorunun emisyon ve performans karakteristiklerine etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. İleri enjeksiyon zamanlamasının CO, HC ve is emisyonlarını düşürdüğü, NOx emisyonlarını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

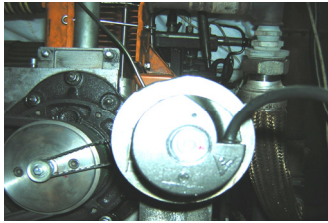
## 2. KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

Temel püskürtme miktarı motor devri ve gaz pedalı konumuyla belirlenmektedir. Püskürtme miktarı, gaz pedalı konumu sinyali arttığında ve motor devri sabit kaldığında yükselmektedir [28]. Yüksek basınç yakıt püskürtme uygulaması ile püskürtme oranı artarken, püskürtme başlangıcı ile yanma başlangıcı arasındaki gecikmeyi ifade etmekte olan tutuşma gecikmesi belirli bir değerin altına düşemez. Bunun sonucunda, ana tutuşma işlemine kadar ki sürede enjekte edilmiş yakıt miktarı artarak kontrolsüz yanma sırasında basıncın ani yükseldiği yanmaya neden olur. Bu hem NOx oranını hem de gürültüyü artırır. Bu nedenle, ön püskürtme yapılarak gürültü ve NOx seviyesi azaltılır [19,28,29]. Bununla birlikte yüksek basınç özgül yakıt tüketiminde iyileşme, partikül emisyonunda azalma sağlamaktadır[12]. Diesel motorlarında kontrol stratejisinin temeli, egzoz ve gürültü emisyonu kanunları dahilinde gereken torkun minimum özgül yakıt sarfiyatı değerinde elde edilmesine dayanır.

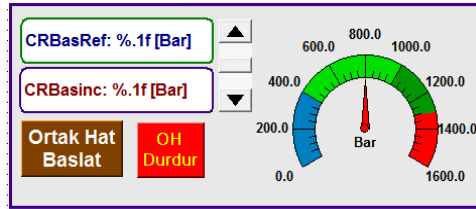
Bu bağlamda öncelikli olarak Diesel motorunda yakıt kontrollü, tork motor hızı ve egzoz emisyonlarının hıza bağlı değişiminin kapalı döngüsü şeklinde olmaktadır. Temel parametre motor hızıdır. Hız parametresine etki eden girdiler ise püskürtme başlangıcı, püskürtme süresi ve basıncıdır[30]. Elektronik olarak kontrol edilecek motorun devrini ve püskürtme sinyalinin oluşturulması için çok önem arz eden ÜÖN sinyalinin alınabilmesi için IVO marka devir başına 360 puls üreten artımsal kodlayıcı 1/2 kasnak oranı ile dişli kayış kullanılarak motor ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 1. Ortak Hat Basınç Kontrol Sistemi



Şekil 2. Artımsal kodyacı bağlantısı



Şekil 3. Basınç değişim görseli

### 2.1. Basınç Kontrolü

Ortak hat püskürtme sisteminin basıncını 200 ila 1600 Bar arası değişken olarak kontrol edebilmek için bir algoritma oluşturulmuştur. Radyal pistonlu yüksek basınç pompası üzerinde yer alan valfin bir darbe genişlik modülasyonlu sinyal ile sürülmesi ile değişken basınç değerleri elde edilmiştir. Pompanın farklı darbe genişliklerinde sağladığı basınç değerleri ortak hatta monte edilmiş gliserin dolgulı manometrede gözlenmiştir. Gözlenen bu basınç değerlerinin sisteme girdi olarak işlenebilmesi için manometrede gözlenen değerler ile ortak hat üzerinde bulunan basınç algılayıcı verisi eşleştirilmiştir. Algılayıcı verisi ile geri besleme yapılarak istenilen basıncın elde edilebilmesi için uygun valf sürme sinyali oluşturulmuştur. Bu amaçla öncelikle giriş işareti olarak basamak giriş uygulanarak sistemin matematik modeli çeşitli çalışma

noktalarından oluşturulmuş ve bu modellerden ortalama bir model oluşturulmuştur. Elde edilen modelin birinci dereceden olduğu görülmüş ve yerleşme zamanı 10ms olacak şekilde oransal-integral kontrolör tasarlanmıştır. Yerleşme zamanının 10 ms seçilmesinin sebebi motorun her devrinde enjeksiyon sırasında ortak hat basınç değerine gelen bozucunun bir sonraki enjeksiyon ana kadar bastırılmasıdır. Şekil 3'te tarafımızdan geliştirilen yazılımda basınç değişim görseli görülmektedir.

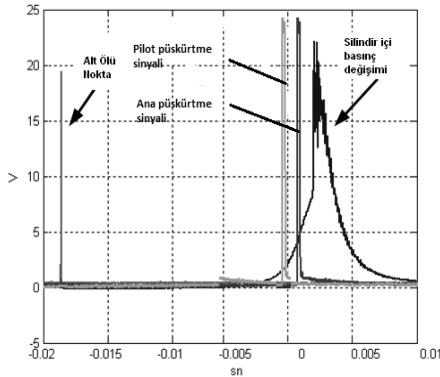
## 2.2. Enjeksiyon Kontrolü

Bir içten yanmalı motor kontrol algoritmasını oluşturabilmek için öncelikle Diesel motorların nasıl çalıştığını anlamak gereklidir. Özetle, Diesel motorlar yanma odasına püskürtülen yakıtın, sıkıştırılan hava ile yanması sonucu yarattığı enerji ile çalışır. Bir motorda temel iki parametre avans açısı ve içeri püskürtülen yakıtın miktarıdır. Detayında, enjektörün krank açısı başına ne kadar yakıt püskürttüğünü etkileyen yakıt basıncı ve bu yakıtın kaç aşamada püskürtüldüğü de motorun çalışma şartlarına etki etmektedir.

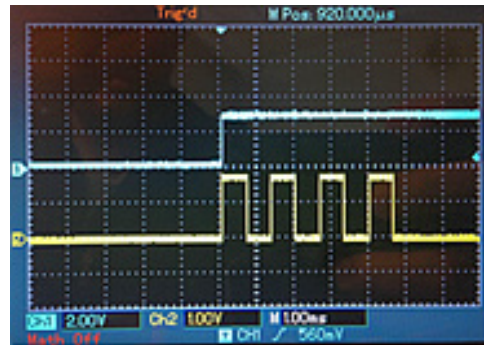
Bu çalışmada motorun yönetimi için PLC tabanlı bir kontrolör kullanılmıştır. Bu kontrolörün seçiminde dikkat edilmesi gereken unsurlar;

- Motor krank shaftının konum bilgisini enkoderden okuyacak hızlı sayıcılar
- Enjektörlere belirli avans açılarında püskürtme yaptırılmasını sağlamak amacıyla hızlı sayıcılara bağlı kesme altprogramı üretebilme yeteneği
- Enjektörler tetiklemede kullanılacak darbe sinyalleri üretecek genişlik modülasyonlu darbe jeneratörü.

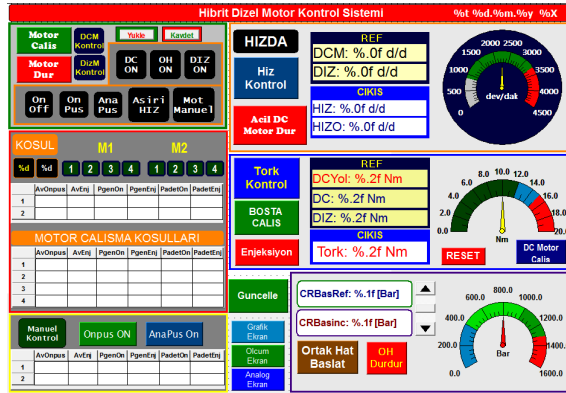
Kontrolör yukarıda bulunan unsurlar dışında gerçek zamanda kontrol işlemlerini yapabilmesi için gerçek zaman saatine de sahip olmalıdır. Belirtilen hususlar göz önüne alındığında, PLC güvenilir, hata ayıklaması kolaylıkla yapılabilen ve ekonomik bir kontrolördür. Bu kontrolör Fonksiyon Blok Diyagram (FBD) yapısında programlanmıştır. Motorun uygun zamanda yeterli yakıtı püskürtmesi için Siemens marka bir PLC kullanılmıştır. Bu PLC'ye ek olarak sıcaklık, yakıt basıncı, motor hızı ve yük değerlerinin görsel olarak gözlenebilmesi için Beckhoff marka bir PLC kullanılmıştır. Enkoder ile içten yanmalı motorun konum bilgisinin okunmasını takiben belirlenen aç değerinde Şekil 4'te görüldüğü gibi bir ön püskürtme ve akabinde bir ana püskürtme gerçekleştirilmiştir. Bu püskürtme zamanları isteğe bağlı değiştirilebilmektedir. Şekil 5'te ise fazla bir püskürtme için elde edilen sinyalin osiloskop görüntüsü, şekil 6'da geliştirilen içten yanmalı motor kontrol yazılımı ekran görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4. İki fazlı püskürtme ve basınç değişimi



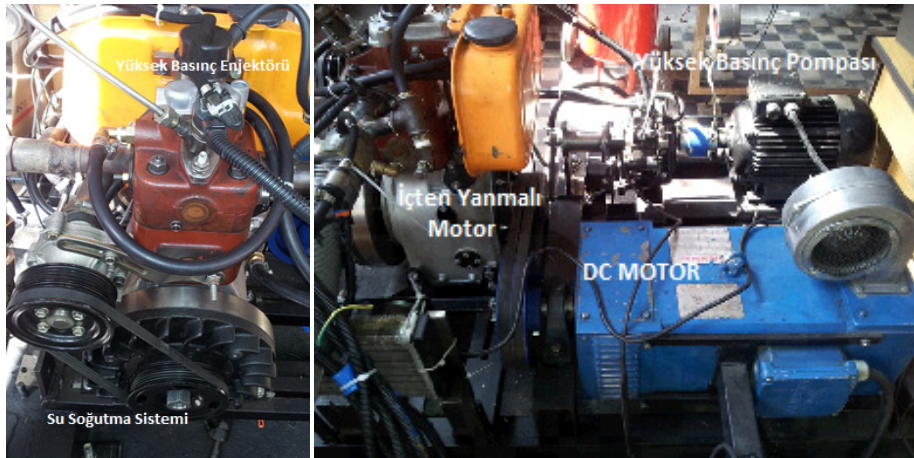
Şekil 5. Fazlı püskürtme sinyali osiloskop görüntüsü



Şekil 6. Geliştirilen içten yanmalı motor kontrol yazılımı ekran görüntüsü

### 3. MOTOR YÜKLEME SİSTEMİ

Sistemde Control Techniques marka Mentor-II, 4 bölge DC motor sürücü kullanılmıştır. Bu sürücü birinci fazda içten yanmalı motora ilk hareket vermek amacıyla kullanılmış, ikinci fazda ise içten yanmalı motorun çevirdiği DC motor tarafından üretilen elektrik enerjisini laboratuvarın şebekesine iletilmesini sağlamıştır. DC motor olarak Femsan marka bir elektrik motoru kullanılmıştır. Diesel motor ile DC motor çift v kayışlı kasnak bağlantısı ile birbirine bağlanmıştır. DC motor askıda kalacak şekilde iki tarafından yataklanmış ve yükleme momenti ölçümü yapılabilecek şekilde moment kolu bağlanmıştır. Şekil 7’de deney düzeneği yapısı görülmektedir.



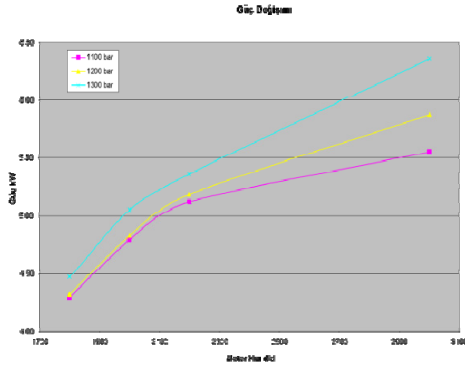
Şekil 7. Tek silindirli püskürtme avansı ve basıncı değiştirilebilen Diesel motor deney düzeneği

### 4. DENEYSSEL ÇALIŞMA

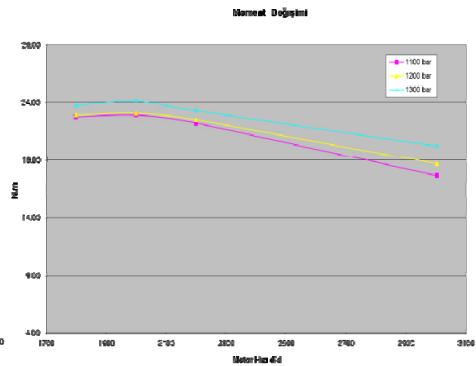
Çalışmanın bu aşamasında yakıt olarak motorin kullanılan tek silindirli bir diesel motorun performansı ile egzoz emisyonlarındaki değişimler incelenmiştir. Püskürtme pilot ve ana püskürtme olarak 2 ye bölünmüştür. Pilot püskürtmede toplam püskürtülen yakıtın %10’u kadar

yakıt püskürtülmüştür. Deneylerde sırasıyla Pilot püskürtme avansı üst ölü noktadan 27 ve 25 derece önce şartları denenmiştir. Bu denemelerde ana püskürtme pilot püskürtmeden 10 derece sonra gerçekleştirilmiştir.

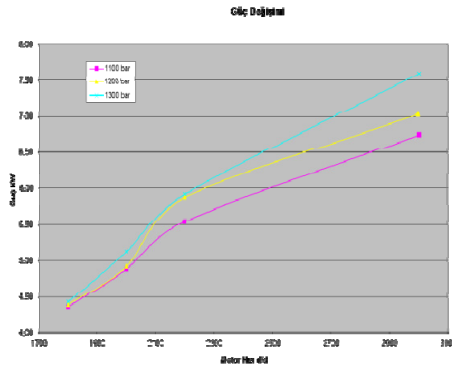
Bu deneyler ışığında, ikili püskürtmede güç değişimi şekil 8 ve şekil 9, moment, değişimleri ise şekil 10 ve şekil 11’de verilmiştir.



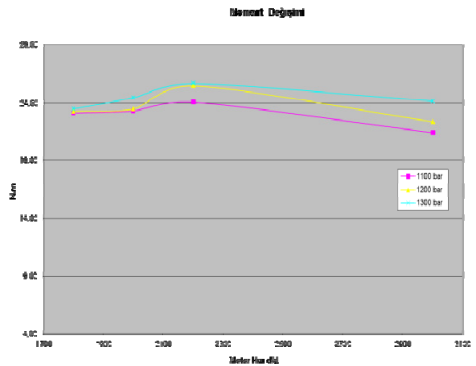
Şekil 8. Pilot 25 Ana 15 Krma şartında ikili püskürtme için güç değişimi



Şekil 10. Pilot 25 Ana 15 Krma şartında ikili püskürtme için moment değişimi



Şekil 9. Pilot 27 Ana 17 Krma şartında ikili püskürtme için güç değişim grafiği

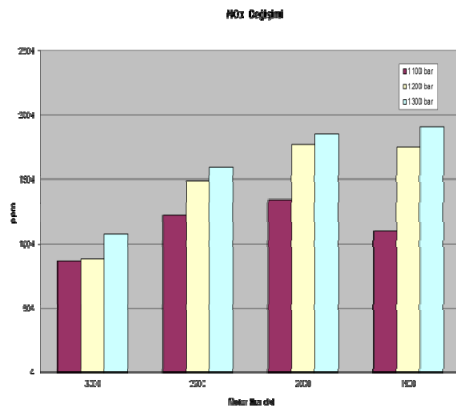


Şekil 11. Pilot 27 Ana 17 Krma şartında ikili püskürtme için moment değişim grafiği

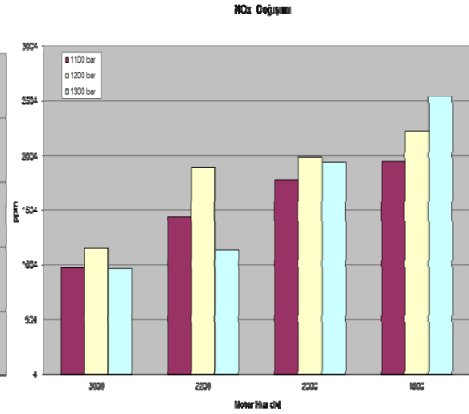
Ön püskürtmenin 25 Kma değerinde ve ana püskürtmenin 15 Kma yapıldığı sonuçlar incelendiğinde, pilot püskürtmenin ÜÖN’ya yaklaştırılmasının tüm yakıtlar için belirgin olarak NOx emisyonlarını azalttığı gözlenmiştir. Ancak performans sonuçları ile eşlenik incelendiğinde ana püskürtmenin ÜÖN’den 15 kma önce, pilot püskürtmenin 25 kma önce yapıldığı durumda, güç ve moment değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Maksimum güç, ana püskürtmenin ÜÖN’den 17 kma önce ve pilot püskürtmenin 27 kma önce yapıldığı durumda gözlenmiştir. Genel olarak erken yapılan püskürtmede NOx emisyonlarında artış görülmüştür.

Şekil 12 ve 13’de verilen emisyon sonuçlarında görüldüğü gibi fazlı püskürtmede de artan püskürtme basıncı ile ufak sapmalar göz ardı edildiğinde genel olarak NOx emisyonlarında artış görülmüştür.





Şekil 12. Pilot 25 Ana 15 Krma şartında ikili püskürtme için NOx Değişimi



Şekil 13. Pilot 27 Ana 17 Krma şartında ikili püskürtme için NOx Değişimi

## 5. SONUÇ

Çalışma kapsamında tek silindirli, su soğutmalı bir Diesel motor için püskürtme basıncı, zamanı ve faz adedi değiştirilebilen bir yönetim sistemi geliştirilmiştir. Bu geliştirilen sistem ile püskürtme sisteminin başta performans ve özellikle NOx üzerine etkileri irdelenmiştir. Tarafımızdan geliştirilen “Ünite Pompalı Tek Silindirli Dize Motorunun PLC Kontrollü Yüksek Basınç Yakıt Püskürtme Sistem ile Araştırma Motoruna Dönüştürülmesi” çalışmasından farklı olarak, bu çalışmada şekil 6’da görülen bir bilgisayar arayüzü oluşturulmuş ve deneylerde içten yanmalı motoru yavaşlatma amacıyla kullanılan DC motorun ürettiği elektrik, dirençlerde harcanmak yerine elektrik şebekesine gönderilmiştir. Ayrıca, önceki sistemde yakıt basıncı bir DC motor sürücü ile PWM sinyali oluşturularak kontrol edilmişken, bu versiyonda sistem üzerinde bulunan yakıt basınç sensöründen geri besleme yapılarak hassas kontrol edilmiştir. Bu çalışmada kurulan deney düzeneği ile yapılan testlerde, fazla püskürtmenin NOx emisyonu azaltması için etkili bir yöntem olduğunu ispatlamış, ancak NOx emisyonunu bu yöntem ile azaltmak bir miktar güçte düşüşüne neden olmuştur.

### **Çizelge 1. Deney Düzeneği Teknik Özellikleri**

#### **İçten Yanmalı Motor**

Silindir hacmi	454 cm <sup>3</sup>
Silindir sayısı	1
Strok	80 mm
Çap	85 mm
Sıkıştırma Oranı	17.5/1
Soğutma tipi	Su

#### **Motor Yükleme Sistemi**

Genaratör tipi	DC
Genaratör gücü	10 kW (Femsan)
Sürücü tipi	4 Bölge (Control Teq.)
Tork ölçümü	Yük Hücresi (Esit)

#### **Verisi Toplama / Yönetim Sistemi**

Silindir içi basınç sensörü	Kistler 6052 B
Basınç sensörü anfişi	Kistler 5011 B
Basınç sensörü veri kayıt yeri	Lecroy-Osiloskop
Yanmalı Motor Konum verisi	IVO artımsal kodlayıcı
Yakıt basınç ölçüm/kontrol	Beckhoff Endüstriyel PC
Sıcaklık ölçümü	Beckhoff Endüstriyel PC
Yanmalı motor yönetimi	Siemens PLC

#### **Acknowledgments / Teşekkür**

Bu çalışma 2012-06-01-KAP02 numaralı Diesel Motorunda Püskürtme Parametrelerinin İş ve NOx Emisyonu Üzerine Etkilerinin Deneysel Araştırılması konulu KAP projesi kapsamında Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü desteği ile gerçekleştirilmiştir.

#### **REFERENCES / KAYNAKLAR**

- [1] Jesús Benajes, José M. García-Oliver, Ricardo Novella, Christopher Kolodziej Increased partial emissions from early fuel injection timing diesel low temperature combustion Fuel 94 (2012) 184–190.
- [2] Avinash Kumar Agarwal, Dhananjay Kumar Srivastava, Atul Dhar, Rakesh Kumar Maurya, Pravesh Chandra Shukla, Akhilendra Pratap Singh Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engines.
- [3] Shuaiying Ma, Zunqing Zheng, Haifeng Liu, Quanchang Zhang, Mingfa Yao Experimental investigation of the effects of diesel injection strategy on gasoline / diesel dual fuel combustion, Applied Energy 109 (2013) 202–212.
- [4] Mohammad Reza Herfatmanesh, Pin Lu, Mohammadreza Anbari Attar, Hua Zhao Experimental investigation into the effects of two stage injection on fuel injection quantity, combustion and emissions in a high speed optical common rail diesel engines, Fuel 109, (2013), 137–147.

- [5] T. Thurnheer, D. Edenhauser, P. Soltic, D. Schreiber, P. Kirchen, A. Sankowski Experimental investigation on different injection strategies in a heavy duty diesel engine: emission and loss analyses, *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 457–467.
- [6] F. Payri, A. Broatch \*, J.M. Salavert, J. Martín Investigation of Diesel combustion using multiple injection strategies for idling after cold start of passenger-car engines, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (2010) 857–865.
- [7] S. Jaichandar, K. Annamalai Combined impact of injection pressure and combustion chamber geometry on the performance of a biodiesel fueled Diesel engine *Energy*, 55 15 June 2013, 330–339.
- [8] A.J. Torregrosa, A. Broatch , A. García, L.F. Mónico Sensitivity of combustion noise and NOx and soot emissions to pilot injection in PCCI Diesel engines, *Applied Energy* 104 (2013) 149–157.
- [9] Daesik Kim, Sungwook Park Optimization of injection strategy to reduce fuel consumption for stoichiometric diesel combustion *Fuel* 93 (2012) 229–237.
- [10] Ali Hocine, Bernard Desmet, Smaïl Guenoun Numerical study of the influence of diesel post injection and exhaust gas expansion on the thermal cycle of an automobile engine, *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1889-1895.
- [11] Kar Mun Pang, Hoon Kiat Ng, Suyin Gan Investigation of fuel injection pattern on soot formation and oxidation processes in a light-duty diesel engine using integrated CFD-reduced chemistry, *Fuel* 96 (2012) 404–418.
- [12] L. Labecki, L.C. Ganippa Effects of injection parameters and EGR on combustion and emission characteristics of rapeseed oil and its blends in diesel engine, *Fuel* 98 (2012) 15–28.
- [13] Avinash Kumar Agarwal, Atul Dhar, Dhananjay Kumar Srivastava, Rakesh Kumar Maurya, Akhilendra Pratap Singh Effect of fuel injection pressure on diesel particulate size and number distribution in a CRDI single cylinder research engine, *Fuel* 107 (2013) 84–89.
- [14] M. Pandian, S.P. Sivapirakasam, M. Udayakumar Investigation on the effect of injection system parameters on performance and emission characteristics of a twin cylinder compression ignition direct injection engine fuelled with pongamia biodiesel–diesel blend using response surface methodology, *Applied Energy* 88 (2011) 2663–2676.
- [15] Greeves, G., Khan, I. M., and Wang, C.H.T.: “Origins of Hydrocarbon Emissions From Diesel Engines,” SAE paper 770259, SAE Trans., vol.86, 1977.
- [16] Greeves, G.: (1979) “Response of Diesel Combustion Systems to Increase of fuel Injection Rate” SAE paper 790037, SAE Trans., vol.88.
- [17] Çelikten, İ., (2003) “An experimental investigation of the effect of the injection pressure on engine performance and exhaust emission in indirect injection diesel engines” *Applied Thermal Energy*, Pergamon 23:2051–2060.
- [18] Çınar, C., Topgöl, T., Ciniviz, M., Haşimoğlu, C., (2005) “Effects of injection pressure and intake CO2 concentration on performance and emission parameters of an IDI turbocharged diesel engine” *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, 25:1854–1862.
- [19] Desantes J.M., Benajes J., (2004) Molina S., C.A. Gonzalez, “The modification of the fuel injection rate in heavy-duty diesel engines” Part 1: Effects on engine performance and emissions, *Applied Thermal Engineering*, 2701–2714.
- [20] Ghaffarpour, M., and Baranescu, R.,(1996) “NOx Reduction Using Injection Rate Shaping and Intercooling in Diesel Engines” SAE Paper 960845.
- [21] Hideyuki Ogawa, Noburo Miyamoto, Chenyu Li, Atsushi Sakai, (2000) “Improvements of Diesel Combustion and Emissions with Two-Stage Fuel Injection at Different Piston Positions” SAE Paper 2000-01-1180.

- [22] Huang, Z., Lu, H., Jiang, D., Zeng, K., Liu, Bing., Zhang, J., Wang, X., (2004) "Combustion behaviors of a compression- ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles" *Bioresource Technology* 95:331-341.
- [23] Miyamoto, N., Ogawa, H., Shudo, T., Takeyama, F., (1994) "Combustion and Emissions in a New Concept DI Stratified Charge Engine with Two-Stage Fuel Injection" *SAE Paper* 940675.
- [24] Papagiannakis, R.G., Hountalas, D.T., Rakopoulos C.D., (2007) "Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection timing on the performance and emissions of a dual fuel diesel engine", *Energy Conversion and Managment*, 48, 2951-2961.
- [25] Salman, S., ve Topgöl T., (2001) "Bir Diesel Motorunda Enjeksiyon Basıncının Motor Performansına, Soğutma Suyu ve Egzoz Gazı Yoluyla Kaybedilen Isı Enerjisine Etkisi" *Politeknik Dergisi*, Cilt 4, 2:27-30.
- [26] Sekmen Y, Çınar C., Erduranlı P., Boran E., (2004) "Diesel Motorlarda Enjeksiyon Basıncı ve Maksimum Yakıt Miktarının Motor Performansı ve Duman Emisyonlarına Etkilerinin İncelenmesi" *Politeknik Dergisi*, cilt 7 sayı 4 s.321-326.
- [27] Uchida, N., Daisho, Y., Saito, T., (1992) "The control of Diesel emissions by supercharging and varying Fuel-injection parameters" *SAE Paper* 920117.
- [28] Denso Corporation, "Opel 4EE2 tipi motor için Commonrail sistemi", İstanbul, 2003.
- [29] Heywood JB (1988) *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Newyork.
- [30] Guzella L., Amstutz, (1998), "Control of Diesel Engines" *IEEE*, 0272-1708/98: 53-71.