

PIEZO ENJEKTÖR AKTÜATÖRÜNE UYGULANAN ÖN YÜK KUVVETLERİNİN ETKİLERİ

Gültekin KARADERE * 
Hande ŞENGÜNALP ANAÇ ** 

Alınma: 30.07.2018; düzeltme: 09.10.2019; kabul: 17.01.2020

Öz: Dizel motorlarının yüksek basınçlı yakıt enjeksiyon teknolojisi, emisyon düzenlemelerinin gerçekleştirilmesinde tatmin edici teknolojilerden biri olarak kabul edilir. Bu teknoloji, yakıtın atomizasyonunu geliştirerek yanma verimini iyileştirip zararlı emisyonları ve gürültüyü azaltabilir. Bu avantajların geliştirilmesi ise ilgili parametrelerin etkilerinin tasarımcılar tarafından biliniyor olmasına bağlıdır. Bu çalışmanın amacı piezo common rail enjektörlerin en önemli parçalarından olan aktüatör modül üzerine uygulanan ön yük kuvvetindeki değişimin enjektörün voltaj ihtiyacına, püskürtme miktarına ve titreşim frekansına etkilerinin deneylerle incelenmesi ve aktüatör modülü oluşturan piezo seramiklerin voltaj altında gösterdikleri boy uzama miktarlarının araştırılmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Piezo common rail enjektör (yüksek basınçlı ortak dağıtıcılı enjektör), aktüatör, ön yük kuvveti

The Effects of Preload Forces Applied to the Actuator of Piezo Injector

Abstract: The high-pressure fuel injection technology of diesel engines is considered to be one of the satisfactory technologies in achieving emission regulations. This technology can improve combustion efficiency and reduce harmful emissions and noise by improving the atomization of fuel. The development of these advantages depends on the fact that the effects of the relevant parameters are known to the designers. The aim of this study is to investigate the effects of the change in the preload force applied on the actuator module, which is one of the most important parts of piezo common rail injectors, to the voltage requirement, spray amount and vibration frequency of the injectors by experiments and to investigate the length elongation of piezo ceramics forming the actor module under voltage.

Keywords: Piezo common rail injector, actuator, preload force

1. GİRİŞ

Son zamanlarda, otomobil endüstrisinde daha sıkı emisyon ve yakıt ekonomisi düzenlemelerine uymak amacıyla Common Rail (CR: ortak dağıtıcı) sisteminin kullanıldığı doğrudan yüksek basınçlı yakıt enjeksiyonu yaygın olarak kabul görmektedir (Chung et al., 2015).

Piezoelektrik tahrikli enjektörler (kısaca piezo enjektörler) üçüncü nesil common rail enjektör ailesini temsil etmektedir. Solenoid enjektörlere göre yaklaşık %50 daha hafif olan

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Görükle 16059, Bursa

** Bosch, Organize Sanayi Bölgesi, Eflatun Cad. No:9, 16140, Bursa

İletişim Yazarı: G. Karadere (karadere@uludag.edu.tr)

bu enjektör ailesinin en büyük özellikleri ise 2000 bar'a kadar çıkan çalışma basınçları, yüksek basınçtaki yakıtın ortak bir dağıtıcıdan enjektörlere beslenmesi, düşük yakıt tüketimi ve düşük miktarda tehlikeli atık gaz (egzoz gazı) üretimidir.

Bir çalışmada piezo enjektörlü Bosch 3. nesil common rail yakıt enjeksiyon sisteminin matematiksel bir modeli oluşturulmuştur (Pogulyaev et al., 2015). Bir dizel motorda enjeksiyon zamanlaması ve rail basıncı gibi enjeksiyon parametrelerinin etkileri deneysel araştırma ve sayısal simülasyonların kombinasyonu ile analiz edilmiş ve üst ölü noktadan sonra yakıt enjeksiyonu için enjeksiyon basıncının yanma işlemi üzerinde daha düşük bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Jurić et al., 2019). Son yıllarda yakıt enjeksiyon sistemlerinin geliştirilmesinde kaydedilen ilerlemeler neticesinde emisyonlar büyük ölçüde azalmıştır (d'Ambrosio and Ferrari, 2018).

Solenoid teknolojisi geleneksel olarak güvenilir ve düşük üretim maliyetli olup ünite fiziksel olarak piezo ünitelerinden daha küçüktür. Ancak solenoid enjektörler piezo ünitelerinden daha fazla titreşim yapma eğiliminde olup daha fazla gürültü oluştururlar. Ayrıca, piezo enjektör solenoid enjektörden daha düşük bir akım gerektirir. Piezo enjektörlerin bir diğer avantajı, piezo paketi 800 N'luk kuvvet üretebilirken, konvansiyonel solenoid sistemler genellikle 100 N'dan daha düşük değerler gösterebilir. Piezo enjeksiyon sistemleri solenoid enjeksiyon sistemlerine göre daha küçük damlacık boyutuna, daha yüksek damlacık hızına ve daha büyük bir koni açısına sahiptir (Chung et al., 2015).

Emisyon normlarına uyulması zorunluluğu ve üstün motor performansı amacıyla şimdiye kadar çeşitli ileri teknolojiler geliştirilmiştir. Bu teknolojiler, binek / ticari araçlarda kullanım için karmaşık ve pahalı elektronik sensörler ve aktüatörler gerektirmektedir. Bunlardan biri olan common rail direkt enjeksiyonlu (CRDI) sistemde dizel motor, yakıt enjeksiyon basıncı, enjeksiyon başlangıcının zamanlaması, enjekte edilen yakıt miktarı, enjeksiyon sayısı, yanma odası tasarımı, nozül sayısı, püskürtme şekli vb. gibi çeşitli faktörlerden doğrudan etkilenir. Bu parametreler ayrıca motor gücü çıkışını da dolaylı olarak etkiler (Agarwal et al., 2013).

Bu çalışmanın amacı piezo common rail enjektör tasarımlarında bazı parametrelerin etkilerini görmek amacıyla, piezo enjektörlerin en önemli parçalarından olan aktüatör (veya aktör) modül üzerine uygulanan ön yük kuvvetindeki değişimin enjektörün voltaj ihtiyacına, püskürtme miktarına ve titreşim frekansına etkilerinin deneylerle incelenmesi ve aktör modülü oluşturan piezo seramiklerin voltaj altında gösterdikleri boy uzama miktarlarının araştırılmasıdır.

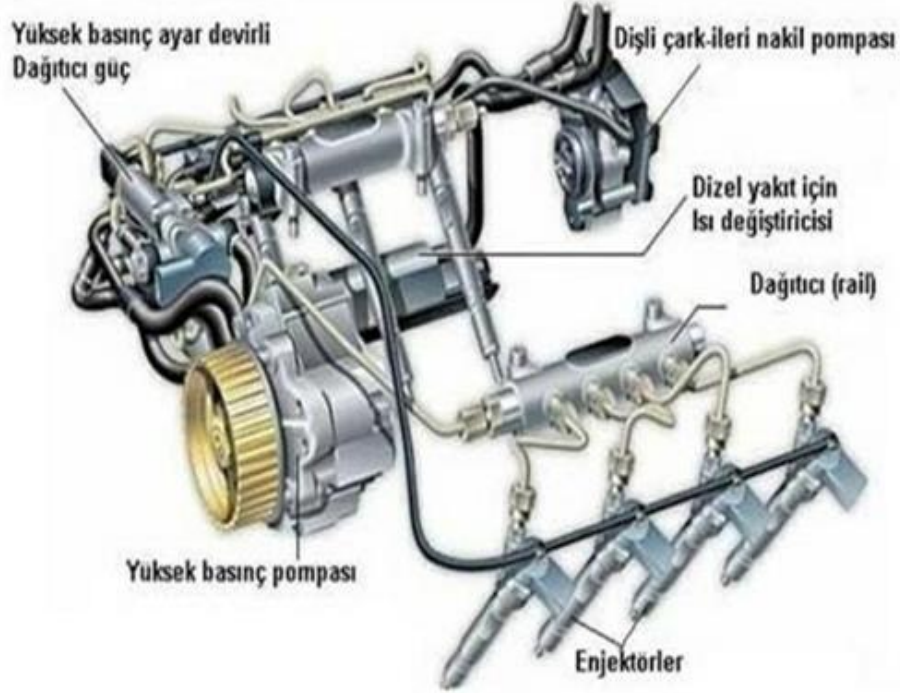
2. YENİ NESİL COMMON RAIL SİSTEMİ VE PİEZO TEKNOLOJİSİ

Konvansiyonel dizel motorların en büyük dezavantajları, çevre sağlığına olumsuz etkileri yanında performansı ve dayanıklılığı da önemli ölçüde etkileyerek ekonomik kayıplara yol açan emisyonlardaki yüksek partikül maddelerdir. Bir çok çalışmada dizel motorlardan salınan partikül maddelerin genellikle benzinli motorlardakinden 10-100 kat daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Gupta et al., 2010). Common rail sistemleri daha kontrollü bir miktarda atomize yakıt oluşturarak yakıt ekonomisini iyileştiren, egzoz emisyonlarında ve motor gürültüsünde önemli bir azalma sağlayan geliştirilmiş dizel motor teknolojileri içinde yer alır (Rissman and Kennan, 2013).

Şekil 1'de görüldüğü gibi sistem adını tüm silindirleri yakıtla besleyen ve basınç akümülatörü görevini yapan yüksek basınçlı ortak yakıt dağıtıcısından almaktadır. Diğer enjeksiyon sistemlerinin aksine, common rail teknolojisinde basınç üretimi ve enjeksiyon birbirinden ayrıdır. Ayrı bir yüksek basınç pompası yakıt dağıtıcısını sürekli olarak yakıtla beslemektedir (Şengüenalp, 2012).

Diğer dizel direkt enjeksiyon sistemleri her püskürtme işlemi için yüksek yakıt basıncını her defasında yeniden biriktirmek zorunda kalırken, common rail sistemi düşük motor devirlerinde bile uygun basınçlı yakıtı daima hazır bulundurmaktadır. Üstelik common rail teknolojisi her çalışma döngüsü başına çoklu püskürtme sağlıyor olmasından ötürü de klasik sistemlerden

ayrılır. Bu döngü, sessiz çalışma için ön püskürtme (pilot enjeksiyon), ideal güç konuşlandırması için ana püskürtme, düşük emisyonlar için ikincil püskürtme şeklinde üçe ayrılır. Yakıt, enjeksiyon memelerine basınçlı kısa hatlar aracılığıyla ulaşır. Püskürtme basıncı ne kadar yüksekse, enjeksiyon sistemi de yakıtı o kadar ince yakıt tanecikleri şeklinde püskürtebilir ve böylelikle daha da verimli bir yanma sağlayabilir (Panzeri, 2011; Hardenberg, 1999).

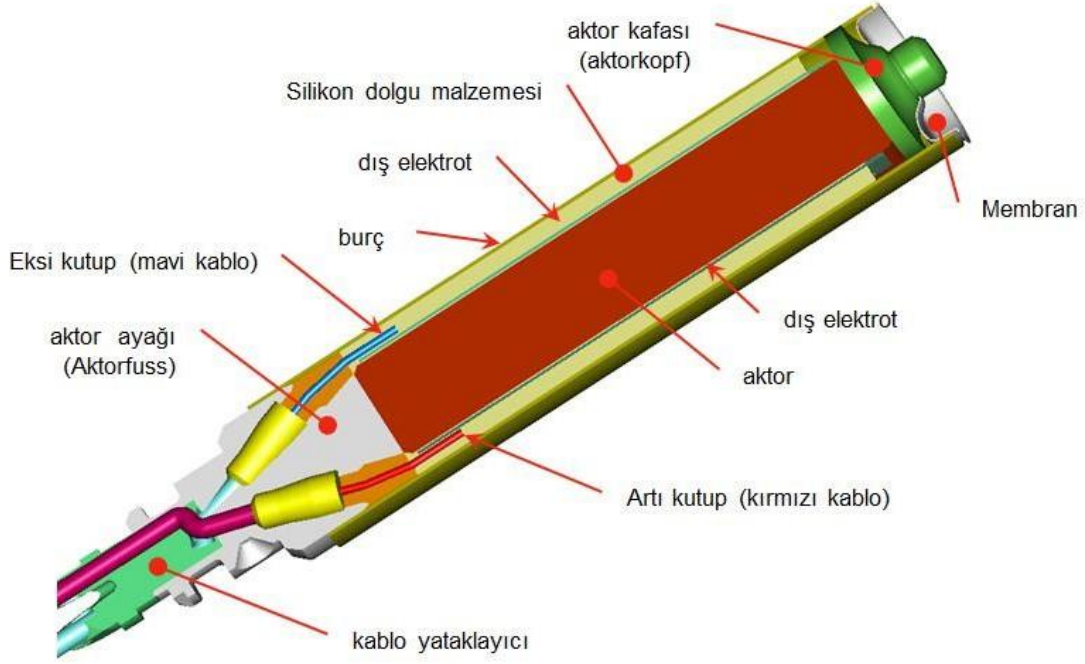


Şekil 1:
Common rail sistemi

Diesel piezo enjektörlerde enjeksiyon valflerine kumanda edebilmek üzere piezo kristallerden yapılmış hızlı tetiklemeli bir erişim düzeneğinden yararlanır. Piezo kristaller bir elektrik alanına bağlandığında birkaç mili saniye içerisinde genişir. Bu şekilde elektronik kumandalı piezo erişim düzeneği, selenoidden beş kat daha hızlı tetikleme yapabilir. Piezo paketinin (aktör modülün) hızlı tetiklemeli hareketi enjektör iğnesine mekanik olmayan bir şekilde, dolayısıyla sürtünmesiz olarak aktarılır. Böylece püskürtülen yakıt miktarının daha hassas ölçülmesi ve yanmadan kaynaklanan zararlı ürünlerin azaltılması sağlanır.

Diesel piezo enjektörlerde kullanılan aktör modül çok sayıda seramik katmanın üst üste getirilmesiyle üretilen bir parçadır. Bu parçanın kablo uzantıları elektrikli tetikleme amacıyla enjektörün dışındaki sokete uzanır. Piezo seramik içeriğinde başlıca kurşun, zirkonya ve titanat bulundurulur. Her bir seramik katmanın arasında her biri yaklaşık 1-2 μm kalınlığında olmak üzere gümüş paladyum metal katmanları bulunmaktadır.

Enjeksiyon başlangıcı için piezo aktör modüle 110 V – 185 V aralığında bir voltaj verilmesi gerekmektedir. Rail basıncına göre istenen voltaj ECU (Elektronik Kontrol Ünitesi) tarafından sağlanacaktır (Robert Bosch, 2002 ve 2005).



Şekil 2:
Aktör modül kesit resmi

Şekil 2’de kesit resmi gösterilen aktör modüle verilen voltajla piezo seramikler uzama eğilimine geçer. Eğer herhangi bir blok kuvvet uygulanmaz ise seramik daha da uzamak ister. Böylece malzeme üzerinde muhtemel çatlaklar oluşabilir. Bu çatlakları önlemek için enjektörün montajı esnasında aktör modül üzerine bir ön yük kuvveti uygulanmaktadır. Ön yük kuvveti Koppler modül (bağlantı modülü) üzerinde bulunan kovan şeklindeki yay ile uygulanmakta, ayrıca Koppler modülde bulunan ayar pulunun kalınlığı değiştirilerek kuvvet büyüklüğü ayarlanabilmektedir (Şengüralp, 2012).

Bir çalışmada piezo aktörün uzamasının zamana bağlı dağılımını tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemiyle piezo paketinin bir modeli geliştirilmiştir (Ferrari and Mittica, 2012).

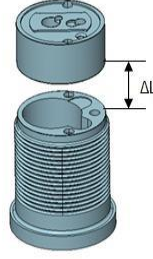
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Aktör Modülün Boy Değişiminin Ölçümü ve Farklı Ön Yük Kuvvetlerinin Ayarlanması

Aktör modülün 200 V voltaj altındaki boy değişimini ölçmek üzere Grossignal adı verilen bir ölçüm cihazı kullanılmaktadır. Bu ölçüm işleminden önce aktör modül üzerinde tasarımcılar tarafından belirlenen 750 ± 10 N’luk bir ön yük kuvvetinin bulunması gereklidir.

Uygulanan ön yük kuvvetinden sonra enjektör gövdesi Grossignal cihazına bağlanır. Aktör modül üzerine tetikleme verilir. Bu esnada lazer ışığı aktarma pistonunun üzerine kadar gelir ve tetiklemeye bağlı olarak aktör modüldeki uzamayı pistonun hareketinden algılar. Toplam 50 adet ölçüm değerinin ortalaması alınır.

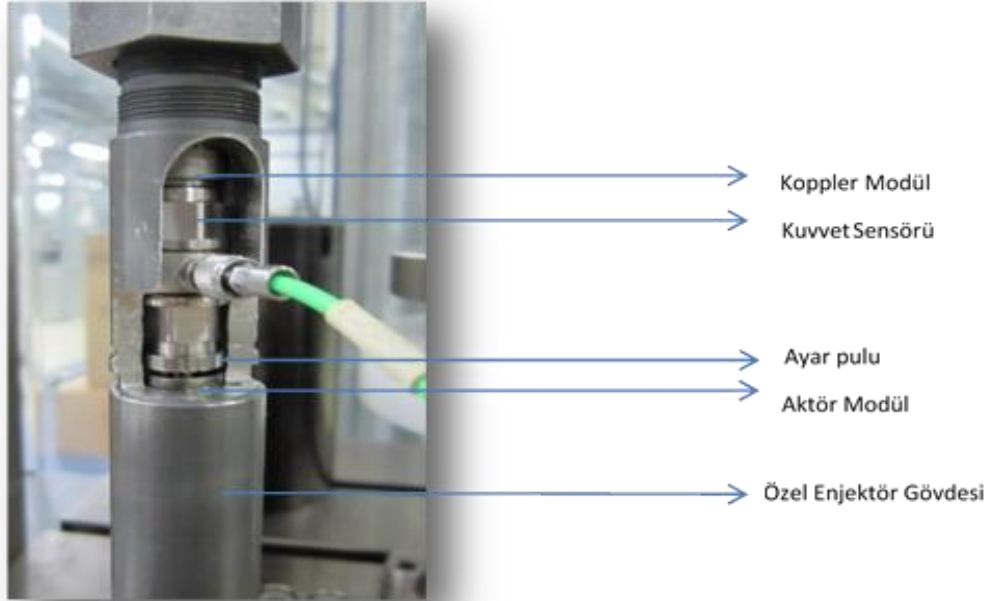
Aktör modül üzerindeki ön yük kuvvetinin sabit tutulabilmesi, enjektör içerisindeki valf plakasının enjektör gövdesi üzerine tam oturabilmesi ile mümkündür. Dolayısıyla uygun kalınlıkta bir ayar pulunun seçimi önemlidir. Pul seçimi, Şekil 3’te gösterilen valf plakası ve enjektör gövdesi arasındaki ΔL boşluk değerine göre yapılır ve toleranslara göre farklılık gösterebilir.



Şekil 3:

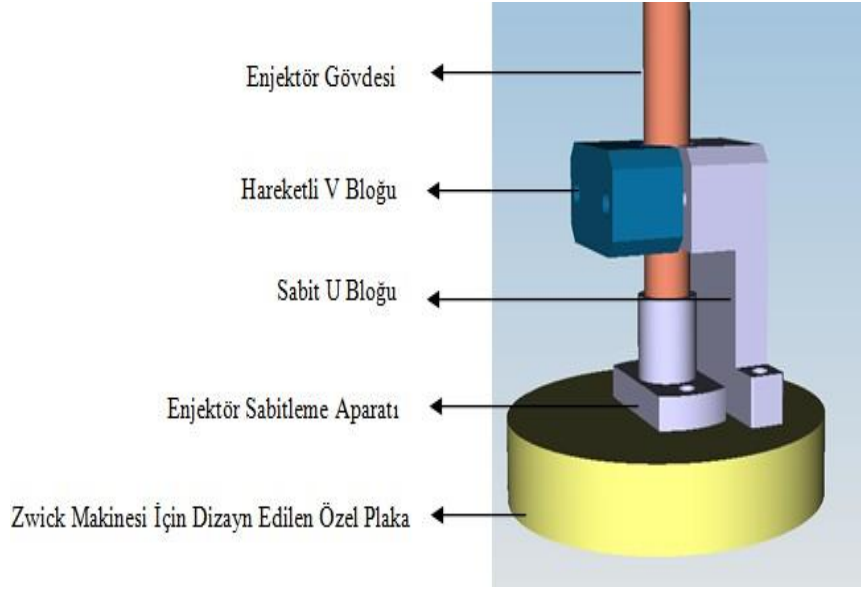
Valf plakası ve enjektör gövdesi arasındaki boşluk

Uygulanmak istenen ön yük kuvvetlerinin laboratuvar ortamında doğru ayarlanıp ayarlanmadığını kontrol etmek amacıyla Şekil 4'te gösterilen özel enjektör gövdesi tasarlanmıştır. Zwick baskı makinesi ile aktör modül üzerine 750 N'luk ön yük kuvveti uygulanmış ve özel sıkma somunu yardımıyla el ile sıkma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak daha sonra üzerindeki yük kaldırıldığında uygulanan kuvvetin sabit kalmadığı ve bir miktar düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni sıkma işlemi sırasında enjektör gövdesinin cihaz üzerinde sabitlenememesi ve sıkma işleminin tam olarak yapılamamasıdır. Buna bağlı olarak da aktör modül üzerinde ön gerilmeyi sağlayan yay kovanı, üzerindeki yük kaldırıldıktan sonra tekrar eski haline gelmeye çalışır ve kuvvetin bir miktar düşmesine neden olur. Bu durumda uygulanmak istenen ön yük kuvveti tam olarak sağlanamaz. Bu nedenle bu sıkma işlemini daha doğru yapabilmek ve araştırılmak istenen farklı ön yük kuvvetlerini daha doğru ayarlayabilmek amacıyla Şekil 5'te gösterilen sıkma aparatları tasarlanmıştır (Carstens, 1993; Şengünel, 2012).



Şekil 4:

Özel enjektör gövdesi ve adaptör parçalar



Şekil 5:
Tasarlanan sıkma aparatlarının montaj resmi

3.2. DeneY Planı ve DeneY Sistemi

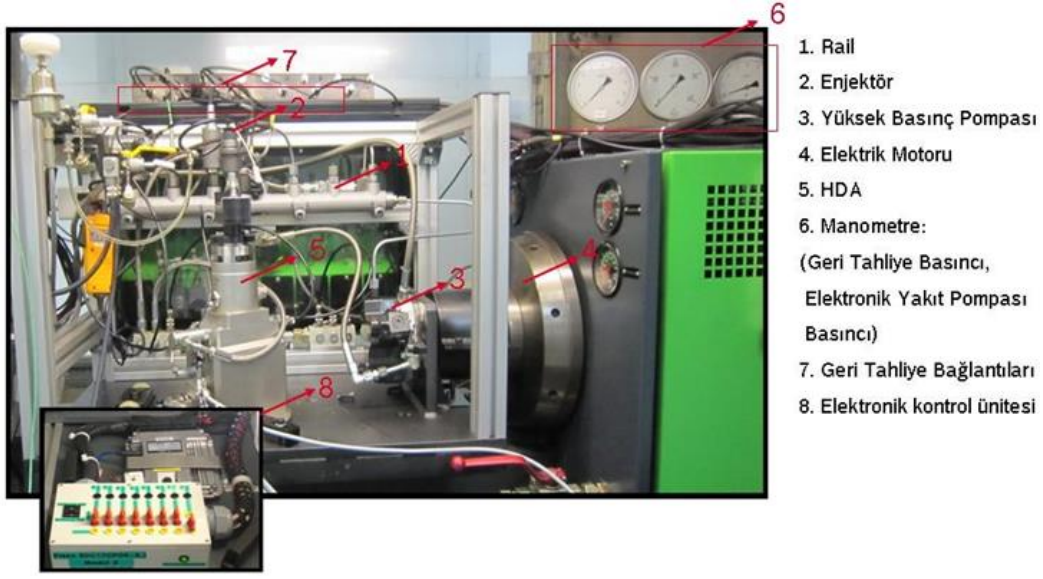
Farklı ön yük kuvvetlerinin aktör modülün uzamasına ve buna bağlı olarak püskürtme miktarlarına, enjektörün çalışması için gerekli olan voltaj değerine ve enjektörün frekans değerlerine olan etkilerini incelemek amacıyla aşağıdaki deneY planı hazırlanmıştır.

- 2000 bar'lık enjektörün valf plakasının enjektör gövdesi üzerine tam olarak oturması için gereken kuvvet değerinin ölçülmesi ve bu kuvvetin hangi kalınlıkta bir pul ile sağlandığının kontrol edilmesi.
- Koppler modülde bulunan ayar pulunun kalınlığının değiştirilerek farklı ön yük kuvvetlerinin yeni tasarlanan sıkma aparatları ile aktör modül üzerinde ayarlanması.
- Her farklı ön yük ayarı sonrasında enjektörün hidrolik ölçümlerinin yapılması.

Hidrolik ölçümlerde enjektör için gerekli olan voltaj ihtiyacı ve belirlenen voltaj ihtiyacına göre deneY noktalarındaki püskürtme miktarları ölçülmüştür.

Enjektör çalışır iken içerisinde hava kalmış ise bu hava aktör modülü ve aktarma modülü arasına sıkışır. Havaya baskı uygulamak yakıta baskı uygulamaktan çok daha kolay olacağı için enjektör çok düşük voltaj ihtiyacına sahip olur ve püskürtme gerçekleşmez. Bu hatanın gerçekleşmemesi için özel vakum cihazları geliştirilmiştir. Enjektör öncelikle vakumlanır, sonrasında belirli bir basınçta ve hızda deneY yağı ile doldurulur. Kısa zamanlı bir çözüm önerisi olarak enjektörler 10 dakika boyunca çalıştırılmıştır. DeneYler aynı sıcaklıkta yapılmıştır. Farklı sıcaklıkta hem deneY yağının viskozitesi ve yoğunluğu, hem de piezo seramiği farklı davranış göstereceğinden 10 dakikalık çalıştırma işleminden sonra enjektör oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır.

Şekil 6'da gösterilen deneY sisteminde motor şartlarının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Motor ve pompa devirleri, rail basıncı, tetikleme süreleri, sıcaklık gibi parametre değişiklikleri INCA programıyla manuel ve Prisma NT programıyla otomatik olarak kontrol edilmektedir. Bu programlar ile tetikleme süresi, basınç miktarı, iki püskürtme arası zaman gibi birçok parametre ayarlanabilmektedir (Şengüenalp, 2012).



Şekil 6:
Hidrolik ölçüm cihazı (HDA) ve deney sistemi

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Deneylerde 1 adet CRI 3-20 tipinde enjektör kullanılmıştır. Her yeni aktör modül ön yük ayarı sonrası enjektöre monte edildikten sonra, enjektörün ihtiyaç duyduğu voltaj ihtiyacı belirlenmiştir. Bu voltaj ile püskürtme miktarları ve BIT14 frekans ölçümleri yapılmıştır.

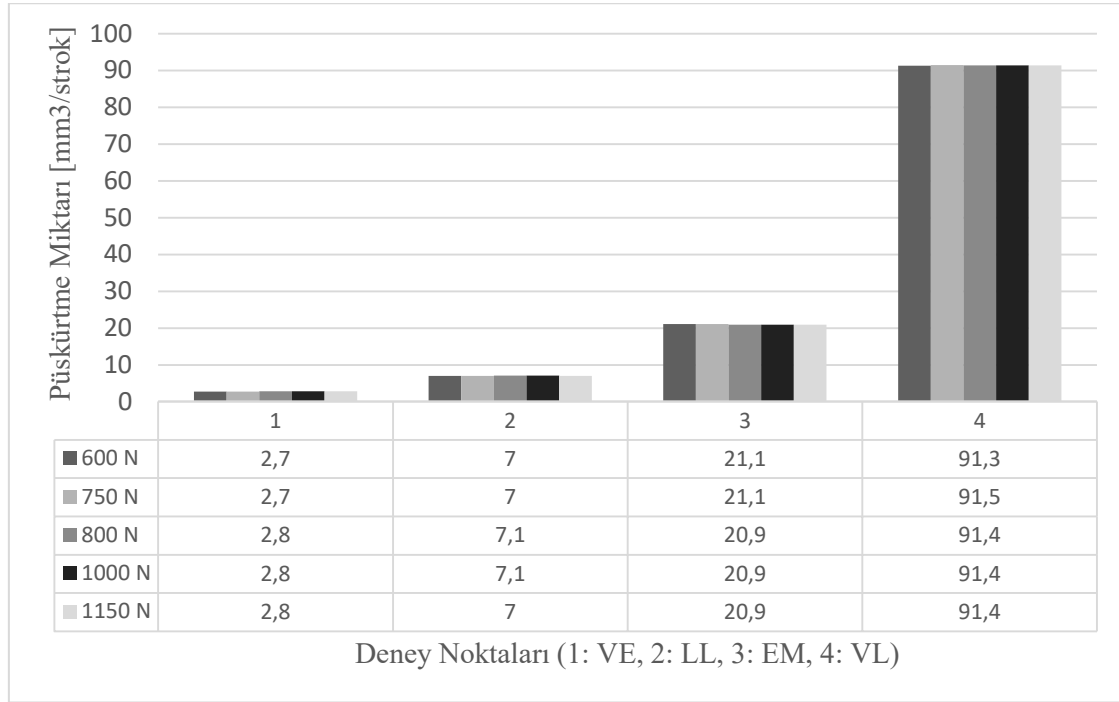
4.1. Enjektörün Voltaj İhtiyacının Belirlenmesi

Ölçümlere 125 V'tan başlanır ve 1'er V aralıklar ile püskürtme miktarı $10 \text{ mm}^3 / \text{strok}$ 'a düşene kadar voltaj miktarı düşürülür. $10 \text{ mm}^3 / \text{strok}$ 'a denk gelen voltaj değerine "karakteristik voltaj" denir. Enjektörün motorda çalışacağı voltaj karakteristik voltaj değerinden yola çıkılarak hesaplanır. 1'er V aralıklar ile bulunan karakteristik voltaj IVA (Injector Voltage Adjustment) adıyla sınıflandırılır. Enjektörün üzerinde yer alan 'DMC' kodların içerisinde enjektörün voltaj ihtiyacı girilir. Enjektör ömründe meydana gelebilecek olan aşınmalar, piezo seramiğinin boyutsal ve kapasitif değişimi nedeni ile püskürtme değerlerinde oynamalar olabilir. Püskürtme miktarının ayarlanması yine ECU tarafından gerçekleştirilir.

Tüm ölçümlerde aynı enjektör ve dolayısıyla aynı aktör modülü kullanılmıştır. Enjektörün çalışma prensibine bakılarak aktör modülü uzama miktarının uygulanan ön yük kuvvet artışı ile artması ve buna bağlı olarak aktör uzama miktarının artışı ile birlikte enjektörün çalışması için gerekli voltaj miktarının düşmesi beklenir.

Ancak 600 N ila 1150 N arasında uygulanan farklı ön yük kuvvetleri için belirlenen voltaj miktarının aynı (107 V) olduğu görülmüştür. Dolayısıyla beklenenin aksine incelenen ön gerilme değeri aralığında ön yük kuvvetinin enjektörün çalışması için gerekli voltaj değerine herhangi bir etkisi olmadığı görülmüştür.

4.2. Deney Noktalarında Püskürtme Miktarlarının Ölçümü



Şekil 7:

Farklı deney noktalarında farklı ön yük kuvvetleri için püskürtme miktarları

Şekil 7’de belirtilen 4 deney noktasının özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

Ön püskürtme noktası (VE) ana püskürtme öncesi kendiliğinden tutuşmayı sağlayabilmek amacıyla püskürtülebilecek en küçük püskürtme miktarının tespit edildiği noktadır (2000 bar - 155µs).

Rölanti noktası (LL) pedala basılmadığı zamanki ve motorun en düşük çalışma rejiminin kontrol edildiği deney noktasıdır (2000 bar - 570 µs).

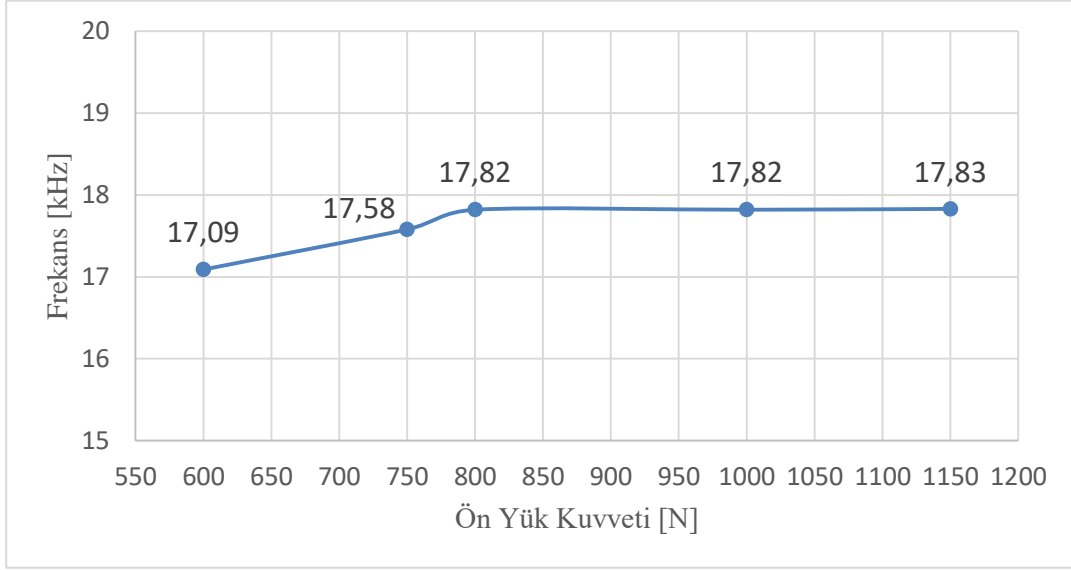
Emisyon noktası (EM) aracın en çok kullanıldığı kısmi gaz konumu olduğundan toplamda en çok kirletici neşredilen deney noktasıdır (2000 bar - 425µs).

Tam yük noktası (VL) pedalın tam olarak basılı olduğu durumdur. En fazla püskürtme miktarının ve en yüksek motor devir sayılarının elde edildiği deney noktasıdır (2000 bar - 790µs).

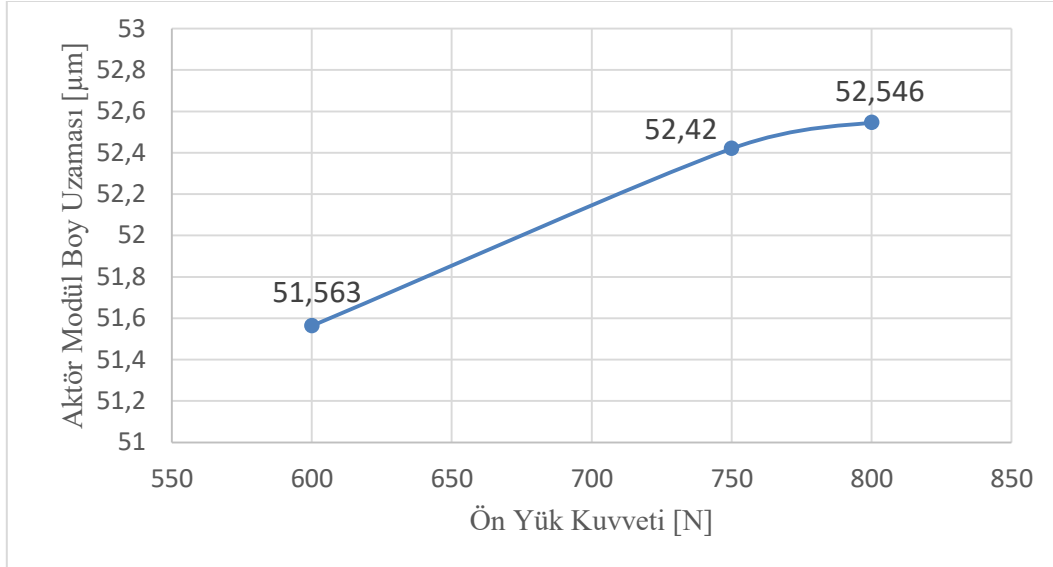
Şekil 7’den görüldüğü gibi herhangi bir deney noktasında uygulanan ön yük kuvvetinin püskürtme miktarları üzerinde önemli bir etkisi olmadığı bulunmuştur. Ancak deney noktası değiştiğinde herhangi bir ön yük kuvveti için püskürtme miktarlarında 2,5 ila 33 kat arası artış gözlenmiştir (Şengüenalp, 2012).

4.3. BIT 14 Frekans Ölçümü

BIT 14 ölçümü enjektör içerisindeki parçaların titreşim frekansının ölçümüdür. Koppler modül içerisinde aktarma pistonu ile valf pistonu arasındaki boşluğun azalmasına bağlı olarak titreşim frekansının artması beklenir. Şekil 8’den görüldüğü gibi 600 - 800 N sahasında ön yük kuvvetinin artması ile frekans değeri % 4,27 oranında artmış, 800 - 1150 N sahasında ise hemen hemen sabit kalmıştır.



Şekil 8:
Tam yük noktasında farklı ön yük kuvvetleri için ölçülen BIT 14 frekans değerleri



Şekil 9:
Tam yük noktasında farklı ön yük kuvvetleri için ölçülen aktör modül boy uzama değerleri

4.4. Aktör Modülün Boy Uzama Değerleri

Şekil 9’da tam yük noktasında 200 V voltaj altında farklı ön yük kuvvetleri için Grossignal ölçüm sonuçlarıyla bulunan aktör modül boy uzama değerleri gösterilmiştir. Diyagramdan görüldüğü gibi uygulanan ön yük kuvveti arttıkça aktör modülün gösterdiği boy uzama miktarı da artmaktadır. 600 - 800 N ön yük kuvveti sahasında aktör modülün boy uzama miktarı ortalama 52 µm değerindedir. 600 - 750 N sahasındaki kuvvet artışına karşılık uzama artışı % 1,66 iken; 750 - 800 N sahasında uzama artışı % 0,24 olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak aktör modül üzerine uygulanan kuvvet arttıkça, piezo seramiklerin voltaj altında gösterdikleri uzama miktarı da artmaktadır (Şengünalp, 2012).

5. SONUÇ

Bu çalışmada farklı ön yük kuvvetleri altında piezo enjektörün çalışması için gerekli voltaj ihtiyacı, enjektörün püskürtme miktarı, titreşim frekansı ve aktör modülü oluşturan piezo seramiklerin voltaj altında gösterdikleri boy uzama miktarları araştırılmıştır. 200 V voltaj altında aktör modüle uygulanan kuvvet artışı ile aktör modüldeki uzama miktarı da beklendiği gibi artmaktadır. Yine buna bağlı olarak, uzama miktarı arttığında enjektörün çalışması için gerekli olan voltaj miktarında bir düşüş olması beklenmektedir. Fakat beklenenin aksine bu durumun çok önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Çünkü uzama miktarlarındaki artış çok küçük değerlerdedir. Ayrıca aktör modüldeki uzama miktarının püskürtme miktarları üzerinde de önemli bir etkisi olmadığı deneylerle belirlenmiştir.

Bir deneysel çalışmada da (Agarwal et al., 2018) belirtildiği gibi, piezo common rail enjeksiyonlu dizel motorlarda yanmayı, performansı, emisyonu ve dayanıklılığı geliştirmek amacıyla gerçekleştirilecek çok sayıda teorik, deneysel çalışmaya ve parametre optimizasyonlarına ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

1. Agarwal, A.K., Dhar, A., Srivastava, D.K., Maurya, R.K. and Singh, A.P. (2013) *Effect of fuel injection pressure on diesel particulate size and number distribution in a CRDI single cylinder research engine*, Fuel, 107, 84-89.
2. Agarwal, A.K., Singh, A.P., Maurya, R.K., Shukla, P.C., Dhar, A. and Srivastava, D.K. (2018) *Combustion Characteristics of a Common Rail Direct Injection Engine using Different Fuel Injection Strategies*, International Journal of Thermal Sciences, 134, 475-484.
3. Carstens, J.R. (1993) *Electrical Sensors and Transducers*, Prentice Hall, 185-199.
4. Chung, M.C., Kim, J., Kim, S.M., Sung, G. and Lee, J. (2015) *Effects of hydraulic flow and spray characteristics on diesel combustion in CR direct-injection engine with indirect acting Piezo injector*, Journal of Mechanical Science and Technology, 29 (6), 2517-2528.
5. d'Ambrosio, S. and Ferrari, A. (2018) *Diesel engines equipped with piezoelectric and solenoid injectors: hydraulic performance of the injectors and comparison of the emissions, noise and fuel consumption*, Applied Energy, 211, 1324-1342.
6. Ferrari, A. and Mittica, A. (2012) *FEM modeling of the piezoelectric driving system in the design of direct-acting diesel injectors*, Applied Energy, 99, 471-483.
7. Gupta, T., Kothari, A., Srivastava, D.K., and Agarwal, A.K. (2010) *Measurement of number and size distribution of particles emitted from a mid-sized transportation multipoint port fuel injection gasoline engine*, Fuel, 89 (9), 2230-2233.
8. Hardenberg, H.O. (1999) *The Middle Ages of the Internal-Combustion Engine*, Society of Automotive Engineers (SAE).
9. Jurić, F., Petranović, Z., Vujanović, M., Katrašnik, T., Vihar, R., Wang, X. and Duić, N. (2019) *Experimental and numerical investigation of injection timing and rail pressure impact on combustion characteristics of a diesel engine*, Energy Conversion and Management, 185, 730-739.
10. Panzeri, S. (2011) *Das Common Rail System*, Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz.
11. Pogulyaev, Y.D., Baitimerov, R.M. and Rozhdestvenskii, Y.V. (2015) *Detailed dynamic modeling of common rail piezo injector*, Procedia Engineering, 129, 93-98.

12. Rissman, J. and Kennan, H. (2013) *Advanced Diesel Internal Combustion Engines, Case Studies on the Government's Role in Energy Technology Innovation*, American Energy Innovation Council.
13. Robert Bosch GmbH (2002) *Bosch Diesel Motor Management*, 3.Auflage.
14. Robert Bosch GmbH (2005) *Bosch Diesel Fuel Injection System*, 5.Auflage.
15. Şengünel, H. (2012) *Enjektöre Uygulanan Ön Gerilme Kuvvet Değişiminin Enjektör Fonksiyonuna Etkileri*, U.Ü.Müh.-Mim.Fak. Bitirme Ödevi.

