

# Endirekt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun Etkilerinin Araştırılması

A.Parlak<sup>1</sup>, V.Ayhan<sup>2</sup>, İ.Cesur<sup>2</sup>, B.Boru<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi Türkiye, aparlak@yildiz.edu.tr

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Türkiye, vayhan@sakarya.edu.tr, icesur@sakarya.edu.tr, barisb@sakarya.edu.tr

## Investigation of The Effects of Steam Injection in a Indirect Injection Diesel Engine

**Abstract**—In this study, the effect of steam injection on a indirect injection diesel engine to reduce NOx emissions was investigated. For this purpose, injection of water steam method into inlet air for a water-cooled, indirect injection diesel engine has been tested. Water steam is obtained from the heat of exhaust gas. And it is injected through an electronically controlled injector during inlet period, depending on full-load and variable speed conditions. The amount of water steam is calculated in different percentages from test engine mass fuel consumption dataset. Optimum fuel-steam mixture ratio in terms of power and emissions is defined experimentally by comparing obtained emission and engine performance data with standard engine data. As a result of experiments under full load conditions, 10% steam injection rate is determined as the optimum rate in terms of engine performance. In this injection rate, the engine torque and effective power was increased 2.2% at the 1000 rpm compared standard engine. Specific fuel consumption was decreased 5.1% at the 1800 rpm for the same injection ratio. Optimum steam injection rate in terms of NOx emissions have been determined as 30%. In this injection rate, NOx emission was decreased up to 43% compared standard engine at the 1000 rpm.

**Keywords**—Diesel engines, Steam Injection, Engine Performance, Emissions

### I. GİRİŞ

NO<sub>x</sub> emisyonlarının oluşma nedeni yüksek sıcaklıklardır ve özellikle yanma odası sıcaklığının 1800 °C' yi geçtiği anda NO<sub>x</sub> oluşum hızı artmaktadır. Dolayısıyla NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmanın ana mekanizması yanma odası sıcaklığının düşürülmesine dayanır. Ancak NO<sub>x</sub> emisyonunun azaltılması yanma odasında oluşan is emisyonlarını olumsuz etkilemektedir. Düşen yanma odası sıcaklığı oksidasyon hızını azalttığından NO<sub>x</sub> emisyonu düşerken is emisyonu bir miktar artar. Bu durumda NO<sub>x</sub>, is emisyonu ve yakıt sarfiyatı arasında optimal bir noktanın bulunması gerekir.

Dizel motorlarında NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılması için geçmişten günümüze pek çok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler silindir içerisinde ve dışında alınabilecek önlemler olarak iki ana başlık altında incelenmektedir [1]. Kaynaklarda dizel yakıtı ile birlikte su kullanımı durumunda maksimum alev sıcaklığının düştüğü ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında dikkate değer oranda azalmaların meydana geldiği ifade edilmektedir [2-10]. Su yanma odasına su-yakıt emülsiyonu halinde,

doğrudan veya emme manifolduna püskürtme şeklinde gönderilmektedir.

Emülsiyon halindeki yakıt-su karışımları NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılmasında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. NO<sub>x</sub> ve PM emisyonlarında önemli oranda düşme söz konusudur. Abu-Zaid [11] tek silindri direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda yaptığı çalışmada, belirli oranlarda su ile karışım hazırladığı emülsiyon yakıtın yanma verimini iyileştirdiğini, momentte artma yakıt sarfiyatında azalmanın olduğunu ifade etmiştir. Emülsife yakıt kullanan çalışmacılardan bir kısmına göre ise is ve PM emisyonlarında azalmaların olduğu ifade edilmiştir [10,12]. Çalışmalarda meydana gelen bu farklılıklara test edilen motorun çalışma şartlarının [10,13-15] ve püskürtme sistemlerindeki farklılık etkili olduğu düşünülmektedir. Emülsife yakıt kullanılması durumunda karışımdan maksimum faydanın alınması için püskürtme avansının da artırılması gerekir [16]. Hang ve ark. [17] tarafından yüksek hızlı kameralarla yapılan çalışmada, emülsife yakıtın saf hidrokarbon yakıtı göre çok daha iyi atomize olduğunu tespit etmişlerdir. Yanma veriminin iyileşmesiyle ilgili olarak A.lif ve ark. [16], sıkışma esnasında buhar haline gelen suyun yakıt ile temasında yüzey gerilmesinin çok küçük olmasının yakıtın çok daha küçük damlacık çaplarına bölünmesine neden olduğunu; artan yüzey alanı nedeniyle yanma esnasında yakıtın hava ile çok daha iyi karıştığını iddia etmişlerdir. Emülsife yakıtın en büyük kısıtlarından birisi karışım yüzdesinin sabit olması ve soğuk çalışma ve geçici çalışma koşullarına göre değiştirilememesidir.

Fumigasyon yönteminde, sıvı haldeki su emme supabı yakınından emme manifolduna gönderilmektedir. Ishida [18] ve Donahue [19] yapmış oldukları çalışmalarında düşük yüklerde fumigasyon yapıldığında NO<sub>x</sub>, is ve özgül yakıt sarfiyatında azalma meydana gelirken, yüksek yüklerde yapılan fumigasyonda NO<sub>x</sub> emisyonunda önemli ölçüde düşme olmasına karşın, is emisyonunda ve özgül yakıt sarfiyatında artmanın olduğunu ifade etmektedirler.

Direk püskürtme yönteminde suyun, fumigasyon yöntemine göre direkt alev cephesi üzerine püskürtülmesi bir avantajdır. Bu sayede su maksimum yanma bölgesine doğrudan püskürtüldüğü gibi silindir cidarına çarparak yoğunlaşma riskinde azaltılmış olmaktadır. Emülsife yakıt kullanımı durumunda ortaya çıkan soğuk çalışma ve geçici çalışma koşullarına göre karışım ayarlama problemi direkt püskürtme yöntemiyle ortadan kalkmaktadır. Direkt püskürtme yönteminin dezavantajı ise ileri ve çok hassas teknoloji gerektirdiğinden

maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu sistemde kullanılan enjektör klasik sistemden tamamen farklıdır.

Bu çalışmada, buhar enjeksiyonunun su soğutmalı endirekt enjeksiyonlu bir dizel motorundan salınan NO<sub>x</sub> emisyonları üzerine etkisi araştırılmıştır. Buhar eldesi için egzoz devresi üzerine monte edilen ısı eşanjörü kullanılmıştır. Isı eşanjöründen elde edilen buhar ortak hatta toplanarak emme periyodu esnasında geliştirilen elektronik kontrol ünitesi ile yakıt sarfiyatının farklı oranlarında motorun emme havası içerisine püskürtülmüştür. Buhar enjeksiyonu neticesinde NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarındaki değişimler standart motor verileriyle karşılaştırılmıştır.

## II. MATERYAL VE METOT

Deneylerde, dört silindri ön yanma odalı, su soğutmalı, dört zamanlı, doğal emişli, Hyundai marka bir dizel motoru kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan deney motorunun teknik özellikleri Tablo 2,1’de verilmiştir.

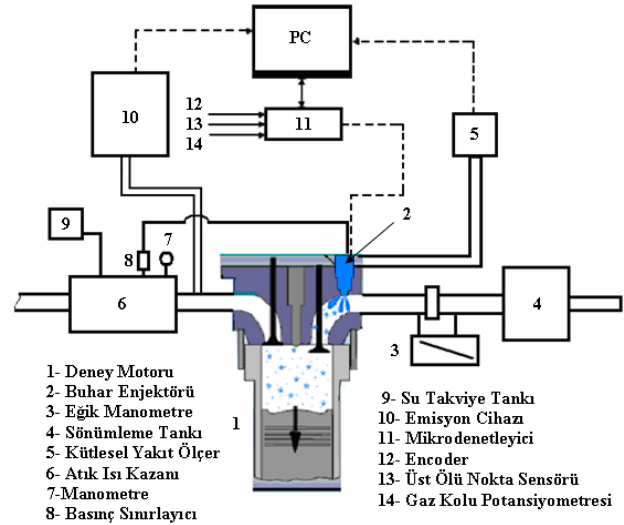
|                           |                |
|---------------------------|----------------|
| Marka                     | Hyundai        |
| Silindir çapı, mm         | 91,1           |
| Strok, mm                 | 95             |
| Silindir sayısı           | 4              |
| Toplam silindir hacmi, lt | 2477           |
| Güç - 4200d/d, kW         | 55             |
| Tork - 2500d/d, Nm        | 149            |
| Sıkıştırma Oranı          | 21             |
| Avans (ÜÖN önce)          | 30°            |
| Soğutma şekli             | Su soğutmalı   |
| Tip                       | Ön yanma odalı |

Tablo 2.1: Test Motorunun Özellikleri

Deneyler esnasında motor Baturalp-Taylan marka hidrolik dinamometre ile yüklenmiştir. Yükleme esnasında hata oranını minimize etmek için dinamometre su giriş basıncı 3 bar da sabit tutulmuştur. Motor tarafından üretilen gücün tespiti için dinamometre koluna 0,1 kg hassasiyetinde S tipi Loadcell bağlanmış ve deneylere başlamadan önce yük hücresinin kalibrasyonu hassas bir şekilde yapılmıştır.

Deney düzeneği Şekil 2.2.’de şematik olarak görülmektedir. Deneyler, tam yük şartlarında 1000, 1400, 1800, 2200, 2600, 3000 ve 3400 d/d ve 30 derece statik püskürtme avansında gerçekleştirilmiştir. Motor gücünü tespit etmek için deney motoru hidrolik dinamometreye bağlanmıştır ve deneyler esnasında dinamometre su basıncı 3 barda tutulmuştur. Ölçüme başlamadan önce motor önce 10 dk. rölantide, daha sonra 2/3 yükte yarım saat çalıştırılarak rejim sıcaklığına getirilmiştir. Frenleme yükü, motor devri, yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyonlarının ölçümüne geçilmeden önce motorun kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Motor kararlı hale geldikten sonra ölçüm gerçekleştirilmiştir. Soğutma suyu çıkış sıcaklığı 70 °C de sabit tutulmuştur. Su debisi rotometre vasıtasıyla ölçülmüştür. Yakıt sarfiyatı ±1g hassasiyetindeki yük hücresi bağlantılı elektronik ölçüm düzeneği ile yapılmıştır.

Egzoz ölçümü için MRU Spectra 1600 L model gaz analiz cihazı, duman ölçümü için ise Bilsa Mode 5000 opacimeter kullanılmıştır.



Şekil 1: Deney Düzeneği

Motora buhar enjekte etmek için bir buhar püskürtme sistemi geliştirmiştir. Sistem, buhar hattı ve yalıtımlı bağlantı boruları, selonoid enjektör, basınç sınırlayıcı, sıcaklık ölçümü için termo elamanlar, atık ısı kazanı, su ilave tankı, santrifüj pompa, abselit Encoder, üst ölü nokta Sensörü ve 8051-F121 mikro denetleyiciden oluşmaktadır. Buhar selonoid enjektörün gecikme süresi 1000 d/d ile 3400 d/d arasında 0,130 ms olarak tespit edilmiştir. Enjektörün gecikme ve püskürme zamanını tespit etmek amacı ile, elektrikli yakıt pompası, regülatör (3 bar), DC elektrik motoru, encoder, devir ölçer ve AND GR–200 model 0,0001 gr hassasiyetinde hassas terazi ve dijital osilaskop kullanılmıştır. Böylece, gönderilecek buhar miktarına bağlı olarak enjektörün açık kalması için gerekli gerçek pals süresi tespit edilmiştir.

Püskürtme sistemi tasarımı ve yazılımın geliştirilmesi için gerekli standart veriler yapılan deneyler sonucu tespit edilmiş, geliştirilen yazılımındaki hata oranını minimize etmek için, ilk deneyler 100 d/d aralıklarla yapılmış olup, gaz kolunun ve yük değişimlerinin her durumu için değerler kaydedilmiştir. Her bir devir, gaz kolu ve yük değişimi için gerekli ara değerler üç boyutlu enterpolasyon yöntemiyle hesap dılmıştır. Püskürtme miktarını ve püskürtme başlangıç açısını kontrol edebilmek için MATLAB’ da yazılım geliştirilmiştir.

Deneyler esnasında hesaplanan ana büyüklüklerin doğruluğu, ölçüm cihazlarının hassasiyetleri olduğu kadar ölçümler esnasında ortaya çıkan farklı faktörlerden kaynaklanabilir. Bu çalışmada, ölçüm esnasında kullanılan cihazların belirsizlikleri ve ölçümden kaynaklanan belirsizlikler belirsizlik analizi ile hesaplanmıştır. Deneyler esnasında her ölçüm noktasında 5 deneyin ortalaması alınmıştır. Elde edilen ortalamaların standart sapması hesaplanarak şüpheli verilerin atılması ya da tekrar edilerek güvenilir limiti içerisine sokulabilmesi için *Chauvenet kriterine* tabi tutulmuştur. Ölçülen büyüklüklerdeki belirsizlikler birbirinden bağımsız olduğunda, bağımlı değişkenin toplam belirsizliği kısmi diferansiyel yöntemine

göre hesaplanabilir. Tablo 2.2' de hesaplanan toplam belirsizlikler görülmektedir.

Tablo 2.2: Sistematik ve rasgele hatalara göre hesaplanmış toplam belirsizlikler (% 99 güvenirlilik aralığında)

| Parametreler                 | Sistematik belirsizlikler, $\pm$ |
|------------------------------|----------------------------------|
| Yük, N                       | 0.1                              |
| Devir, d/d                   | 1.0                              |
| Zaman, s                     | 0.1                              |
| Sıcaklık, °C                 | 1                                |
| Yakıt tüketimi, g            | 0.1                              |
| NOx, ppm                     | 5                                |
| CO, %                        | 0.06                             |
| HC, ppm                      | 12                               |
| Duman sayısı, %              | 1                                |
|                              | Toplam Belirsizlik, %            |
| Özgül Yakıt sarfiyatı, g/kWh | 1.5                              |
| Moment, Nm                   | 0.8                              |
| Efektif güç, kW              | 1.4                              |
| Efektif Verim                | 1.0                              |

Karşılaştırma açısından deneyler ilk önce dizel yakıtı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra egzoz atık ısısından elde edilen su buharı motor emme zamanında, emme manifolduna ve emme supabı açık iken motor yakıt sarfiyatının % 10, % 15, % 20, % 30 ve % 40 kütle oranlarında motora enjekte edilmiştir. Her bir buhar püskürtme oranı için deneyler tekrarlanmış olup motor performans ve emisyon değerleri ölçülmüştür.

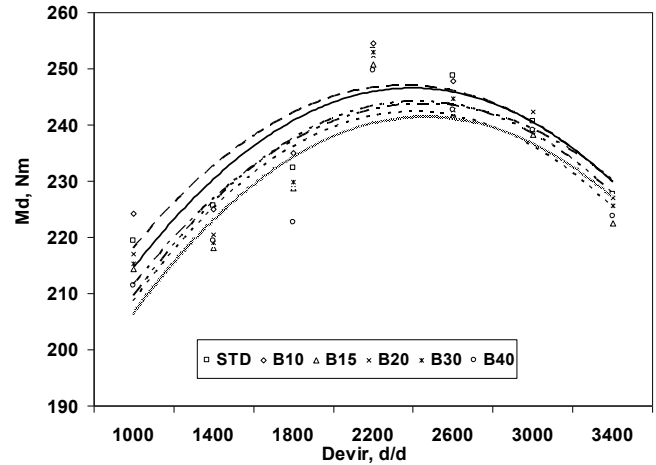
## II. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 1. Motor Performans Parametrelerindeki Değişimler

Egzoz enerjisinden elde edilen buharın bir dizel motoruna, emme periyodunda yakıt sarfiyatının % 10, % 15, % 20, % 30 ve % 40 oranlarında püskürtülmesinin motor döndürme momenti üzerine etkileri Şekil 3.1' de görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi motora farklı oranlarda buhar püskürülmesi durumunda elde edilen döndürme momenti değerleri %10 buhar püskürtme oranı için tüm motor devirlerinde standart değere artmaktadır. Diğer püskürtme oranlarında döndürme momentinde azalmalar görülmüştür.

Motorun standart şartlarda çalışması durumunda maksimum moment 2200 d/d' da 253,2 Nm olarak ölçülmüştür. Motora buhar püskürtülmesi durumunda maksimum momente aynı devirde % 10 buhar oranında ulaşılmış ve bu şartlardaki moment değeri 254,5Nm olarak ölçülmüştür. Diğer püskürtme oranlarında çoğunluğu belirsizlik sınırlarında kalmakla birlikte püskürtülen buhar miktarına bağlı olarak momentte bir miktar artma meydana gelmiştir. %10 Buhar püskürtme durumunda momentteki maksimum artış 1000 d/d da %2.2 ölçülmüştür. Momentteki hesaplanan belirsizlik değerinin %0.8 olduğu dikkate alındığında bu artış anlamlıdır. Buhar püskürtme durumunda anlamlı olan diğer artış %1.2 ile 1800 d/d da olmuştur. Diğer devirlerdeki artış belirsizlik sınırları içerisinde. %40 buhar oranında 1800 d/d da %4.2 lik bir düşme gözlenmiştir. Çıkan sonuçlardan püskürtmenin ön

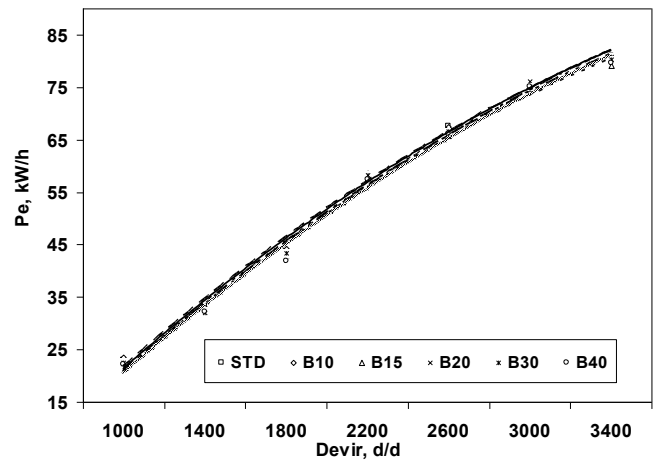
yanma odalı motorda %10 değerinin üzerine çıkarılmaması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.1: Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak döndürme momentindeki değişim

%10 buhar püskürtme durumunda momentteki artışı Lif ve ark.[16] ve Wang ve ark.[20] silindir içerisine gönderilen su damlacıklarının yakıt ile teması esnasında yüzey gerilmesinin çok küçük olması dolayısıyla, mikro patlamalarla yakıtın çok daha küçük damlacıklara bölünmesine neden olduğunu şeklinde ifade etmektedirler. Damlacık çaplarının küçülmesine bağlı olarak yanmaya iştirak eden toplam damlacık yüzey alanı arttığı için yanma veriminin iyileştiğini ve dolayısıyla motorun döndürme moment ve gücünde artmaya neden olduğunu iddia etmektedirler. Çalışmada, motordaki güç ve moment artışının diğer nedeni olarak mikro patlamalara bağlı olarak yanma verimindeki iyileşmelerin neden olduğu söylenebilir.

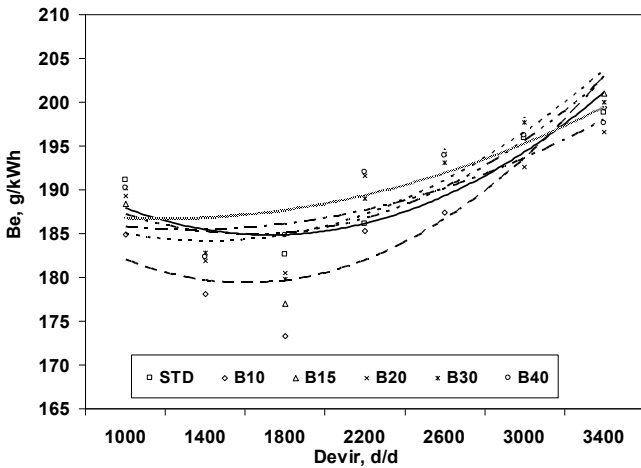
Motora emme periyodunda yakıt sarfiyatının kütle oranlarında buhar püskürtülmesinin efektif güce etkileri Şekil 3.2' de görülmektedir. Motora farklı oranlarda buhar püskürülmesi durumunda elde edilen efektif güç değerleri momentte olduğu gibi sadece %10 buhar oranında tüm motor devirlerinde standart değere göre daha yüksektir.



Şekil 3.2: Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak efektif güçteki değişim

Motorun standart şartlarda çalışması durumunda maksimum güç 3400 d/d' da 81 kW olarak ölçülmüştür. Motora buhar püskürtülmesi durumunda maksimum güce aynı motor devrinde % 10 buhar oranında ulaşılmış ve bu şartlardaki (3400 d/d) güç değeri standart motor değeriyle aynı güç değeri ölçülmüştür. Ancak diğer test devirlerinde %10 buhar oranında standart motora göre artmalar gözlenmiştir. Buhar oranı arttıkça maksimum güç değerinde düşmeler gözlenmiştir. En yüksek güç düşmesi %40 buhar oranında 79.6 kW olarak ölçülmüştür. Ancak güçteki düşmeler belirsizlik değerinin % 1.4 olduğu dikkate alındığında anlamlılık düzeyinin düşük olduğunu göstermektedir.

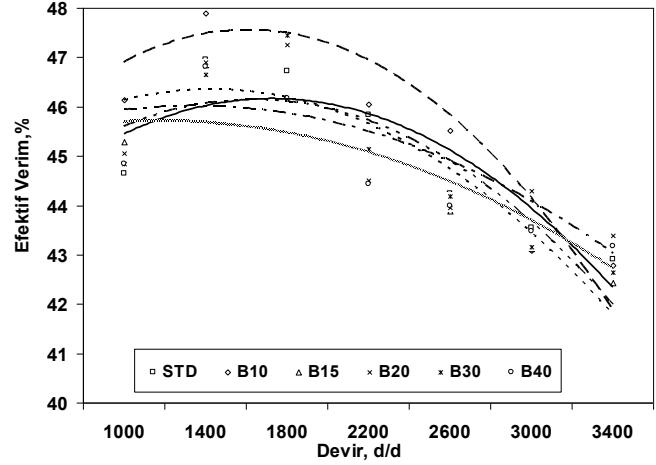
Motora emme periyodunda buhar gönderilmesinin özgül yakıt sarfiyatına(ÖYS) etkileri Şekil 3.3' de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, motora buhar püskürtülmesi durumunda %10 buhar oranında tüm devirlerde standart motora göre özgül yakıt azalmalar görülmektedir. Diğer tüm buhar püskürtme oranlarında 1800 d/d dahil olmak üzere bu devrin altında azalma üstünde ise büyük ölçüde artmalar gözlenmiştir. Güç ve momentte %10 püskürtme oranı dışındaki azalmaya karşın düşük devirlerde ÖYS' nin artmasının ana nedeni püskürtülen buharın hazırlık safhasının karşının fiziksel ve kimyasal hazırlık safhasının ve dolayısıyla yanma veriminin daha iyi olması olarak yorumlanmaktadır. Buhar püskürtmenin olumlu etkisi özellikle ön yanmalı motorda düşük motor devirlerinde daha belirgin iken yüksek motor devirlerine (>1800 d/d) çıkıldıkça kötüleşmeler meydana gelmektedir. Standart motorda ölçülen minimum ÖYS 1000 d/d da 191,1 g/kWh iken %10 buhar oranında aynı motor devrinde 184,9 g/kWh ölçülmüştür. %10 buhar oranında ÖYS' daki en yüksek iyileşme yüzdesi ise %5.1 ile 1800 d/d da olmuştur. Belirsizlik değerinin %1.5 olduğu dikkate alındığında azalma değeri anlamlıdır.



Şekil 3.3: Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak özgül yakıt sarfiyatındaki değişim

Şekil 3.4' de motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesinin tam yük şartlarında efektif verime etkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği devirlerde %10 buhar püskürtme oranında tüm devirlerde, diğer püskürtme oranlarında ise 1800 d/d nın altındaki devirlerde efektif verimin %2.5 ' e varan oranda (1800 d/d) arttığı gözlenmiştir. Diğer püskürtme oranlarında düşük

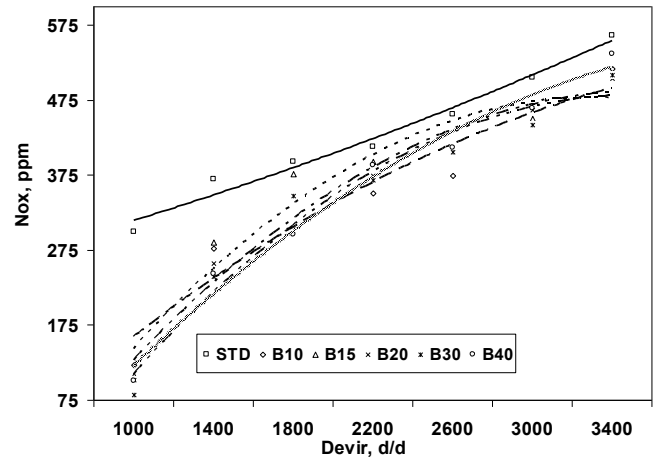
devirlerdeki artmalar belirsizlik sınırlarının içerisindeydir. 1800 d/d nın üzerindeki devirlerde ise efektif verimdeki azalma %1 seviyelerinin altındadır. Bu devirlerde ölçülen azalmalar da büyük ölçüde belirsizlik sınırları içerisindeydir. Standart motorda ölçülen maksimum verim 1800 d/d da %46,7 iken %10 buhar oranında %49,2 seviyelerine çıkmıştır.



Şekil 3.4: Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak efektif verimdeki değişim

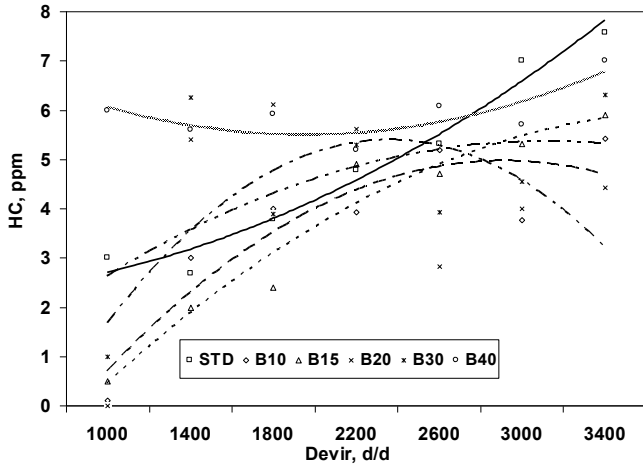
## 2. Egzoz Emisyonlarındaki Değişimler

Tam yük şartlarında dizel motoruna farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda NO<sub>x</sub> emisyonunun standart değerlere göre değişimleri Şekil 3.5' de görülmektedir. Motora buhar püskürtülmesi durumunda NO<sub>x</sub> emisyonlarında standart değerlere göre dikkate değer oranda azalmalar kaydedilmiştir. Özellikle düşük devirlerde standart motora göre NO<sub>x</sub> emisyonundaki azalma dikkate değerdir. Şekiller incelendiğinde 1000 d/d da NO<sub>x</sub> emisyonundaki düşme %30 buhar oranında %43' lere ulaşmaktadır. Performansta tüm devirlerde iyileşmenin sağlandığı %10 buhar oranında bu devirde NO<sub>x</sub> emisyonlarında meydana gelen düşme ise %23 ölçülmüştür. Şekiller incelendiğinde tüm motor devirlerinde buhar püskürtmenin NO<sub>x</sub> emisyonunu önemli ölçüde düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 3.5: Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak NOx emisyonundaki değişim

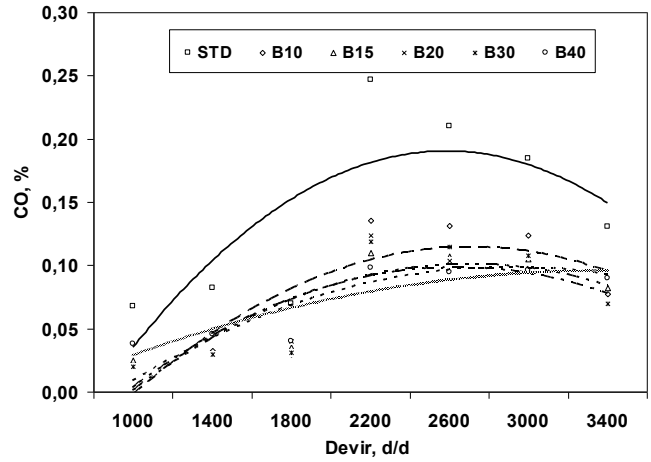
Motora farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ölçülen HC emisyonları ile standart şartlarda ölçülen HC değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3.6' de görülmektedir. Standart ve buhar püskürtme durumunda ölçülen HC emisyonları oldukça düşüktür. Tablo 5' de HC için emisyon cihazının belirsizlik değeri  $\pm 12$  ppm dir. Genel olarak standart durumda ve farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda ölçülen HC değerlerinin belirsizlik sınırı içerisinde kaldığı görülmüştür. Dolayısıyla HC emisyonlarında artma ya da azalmadan bahsetmek ölçüm cihazının belirsizlik sınırları dikkate alındığında anlamsız kalmaktadır. Belirsizlik limitleri de dikkate alındığında HC emisyonunda ciddi bir değişim olmaması su buharı püskürtülmesinden HC emisyonlarının etkilenmediği sonucu çıkarılabilir.



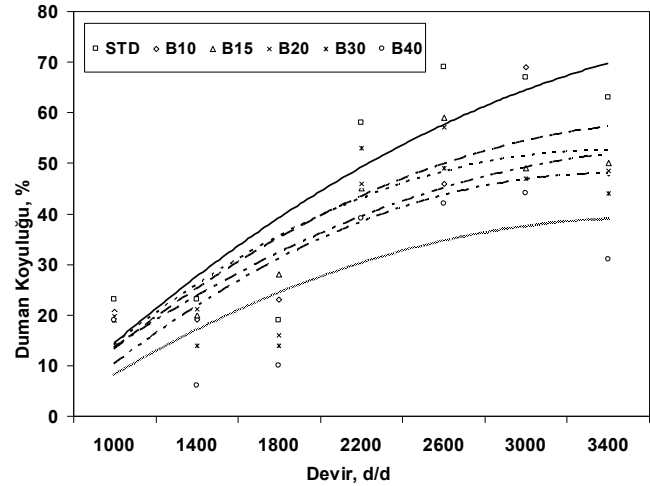
Şekil 3.6: Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak HC emisyonundaki değişim

Şekil 3.7.' de tam yük şartlarında farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda açığa çıkan CO emisyonlarının standart şartlarda ölçülen değerlerle karşılaştırması görülmektedir. Buhar püskürtülmesi durumunda CO emisyonlarında azalmaların olduğu tespit edilmiştir. Standart şartlarda ölçülen maksimum CO değeri 2200 d/d' da % 0.21, buhar püskürtülmesi durumunda ölçülen maksimum CO değeri ise 1800 d/d' da % 0.14 dur. Buhar enjeksiyonu ile CO emisyonunu önemli ölçüde azalttığı anlaşılmaktadır. Motor performansının maksimum olduğu %10 buhar püskürtme durumunda maksimum azalma 2200 d/d'da % 61 olmuştur.

Şekil 3.8.' de tam yük şartlarında farklı oranlarda buhar püskürtülmesi durumunda açığa çıkan duman emisyonlarının standart şartlarda ölçülen değerlerle karşılaştırması görülmektedir. Buhar püskürtülmesi durumunda duman emisyonlarında azalmaların olduğu gözlenmiştir. Maksimum azalma %40 buhar püskürtme durumunda elde edilmiştir. Standart şartlarda ölçülen maksimum duman koyuluğu 2600 d/d' da % 69 iken, aynı devir için % 40 buhar püskürtülmesi durumunda ölçülen maksimum duman koyuluğu %42 olarak ölçülmüştür. Farklı oranlarda buhar enjeksiyonu ile is emisyonlarında standart duruma göre %50 'ye varan oranda azalmaların olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.7: Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak HC emisyonundaki değişim



Şekil 3.8: Buhar oranına ve motor devrine bağlı olarak duman koyuluğu değişimi

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, egzoz enerjisinden elde edilen buhar yakıt tüketiminin farklı oranlarında elektronik kontrollü olarak indirekt enjeksiyonlu bir dizel motoruna emme periyodunda ve emme supabı açık iken püskürtülmesinin motor performans parametrelerine ve emisyon değerlerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Motor performans parametreleri açısından, buhar gönderilmesi durumunda, motor döndürme momenti, efektif güç ve efektif verimde artmalar olurken özgül yakıt sarfiyatında azalmalar meydana gelmiştir. Performans parametrelerindeki artışın nedeni; silindir içerisine gönderilen su damlacıklarının yakıt ile teması esnasında yüzey gerilmesinin çok küçük olması dolayısıyla, mikro patlamalarla yakıtın çok daha küçük damlacıklara bölünmesine neden olduğu literatüre bağlı olarak söylenebilir. Damlacık çaplarının küçülmesine bağlı olarak yanmaya iştirak eden toplam damlacık yüzey alanı arttığı için yanma veriminin iyileştiğini ve dolayısıyla motor performans parametreleri artmaktadır.

Dizel motorları yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalıştıkları için, CO ve HC emisyonları benzinle çalışan motorlara göre oldukça düşüktür. Buna karşılık NOx emisyonu oldukça

yüksektir. Bu çalışmanın sonucunda, dizel motorları için büyük problem oluşturan NO<sub>x</sub> emisyonlarında dikkate değer oranda azalmalar meydana gelmiştir. Motordan salınan is emisyonları incelendiğinde her püskürtme oranı için azalmalar görülmüştür. CO emisyonları standart şartlarla karşılaştırıldığında buhar püskürtülmesi durumunda azalmaların olduğu gözlenmemiştir. HC emisyonunda ise bir miktar artmaların olduğu tespit edilmiştir.

#### KISALTMALAR

HC :Hidrokarbon  
CO :Karbonmonoksit  
NO<sub>x</sub>:Azotoksitler  
ÖYS:Özgül yakıt sarfiyatı  
STD:Standart dizel  
B10 :%10buhar  
EGR:Egzoz gazı resirkülasyonu

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 108M261 nolu TUBİTAK 1001 projesiyle desteklenmiştir. TUBİTAK' a maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR

- [1] V.Ayhan, İ.Cesur, A.Parlak, B.Boru, "Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun Performansa Ve NO<sub>x</sub> Emisyonlarına Etkilerinin Araştırılması", 10. Uluslar arası Yanma Sempozyumu, Ekim, 2008, Sakarya, Türkiye.
- [2] F. Bedford, C. Rutland, P. Dittrich, A. Raab and F. Wirbeleit, " Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion", SAE paper 2000-01-2938, 2000.
- [3] J.P. Mello, A.M. Mellor, "NO<sub>x</sub> emissions from direct injection diesel engines with water/steam dilution", SAE paper 1999-01-0836, 1999.
- [4] M. Christensen, B. Johansson, "Homogeneous charge compression ignition with water injection", SAE paper 1999-01-0182, 1999.
- [5] K.P. Duffy, A.M. Mellor, "Further developments on a characteristic time model for NO<sub>x</sub> emissions from diesel engines", SAE paper 982460, 1998.
- [6] M.A. Psota, W.L. Easley, T.H. Fort, A.M. Mellor, "Water injection effects on NO<sub>x</sub> emissions for engines utilizing diffusion flame combustion", SAE Trans. J. Engines 106 (1997) 1835–1843 (SAE 971657, Section 3).
- [7] S. Kohketsu, K. Mori, K. Sakai, "Reduction of exhaust emission with new water injection system in a diesel engine", SAE paper 960033, 1996.
- [8] Y. Yoshimoto, M. Tsukahara, T. Kuramoto, "Improvements of BSFC by reducing diesel engine cooling losses with emulsified fuel", SAE paper 962022, 1996.
- [9] G.E. Andrews, K.D. Bartle, S.W. Pang, A.M. Nurein, "Diesel/water emulsions: influence on ignition delay and emissions, Proceedings of the International Center

- for Heat and Mass Transfer", Hemisphere Publication Corp., New York, September 1987, pp. 613–625.
- [10] Samec N, Kegl B, Dibble RW. "Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a Diesel engine". Fuel 2002;81: 2035–44
- [11] M.Abu-Zaid, Performance of single cylinder, direct injection Diesel engine using water fuel emulsions,Energy Conversion and Management 45 (2004) 697-705.
- [12] O. Armas,\*, R. Ballesteros, F.J. Martos, J.R. Agudelo " Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel", Fuel 84, 1011-1018, 2005.
- [13] Park JW, Huh KY, Park KH. "Experimental study on the combustion characteristics of emulsified Diesel in a rapid compression and expansion machine", Proc Inst Mech Eng 2000;214(Part D):579–86, 2000.
- [14] Harbach JA, Agosta V. "Effects of emulsified fuel on combustion in a four-stroke Diesel engine", J Ship Res 1991;35(4):356–63, 1991.
- [15] Heinrich G, Prescher K, Finsterwalder G. "Diesel combustion adding water and methanol", MTZ 1984;45(5):183–8 [in German].
- [16] Anna Lif and Krister Holmberg, Water-in-diesel emulsions and related systems, Advances in colloid and interface science, 2006, 231-239
- [17] HANG, X., Yunbia, O.S., Chongji, Z., Yuanji, M., Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Natl Inst of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, p. 307, USA, 1991.
- [18] Ihsida. M., Ueki, H., Sakaguchi. D., "Prediction of NO<sub>x</sub> Reduction rater due to port water injection in a DI Diesel engine, SAE 972961,1997.
- [19] Donahue,R., "Controlling Combustion using in cyclinder mixture preparation ", PhD. Thesis,Mechanical Engineering ,UW madison,2000.
- [20] Wang, CH., Chen JT., " An Experimental investigation of the burning characteristics of water-oil emulsions.",Int. Commun Hcat Mass Tranfer 1996;23(6):823-34.