

1. GİRİŞ

Homojen dolgulu sıkıştırma tutuşmalı (HCCI) yanma prosesi, adından da anlaşıldığı üzere homojen bir karışımın sıkıştırma yoluyla kendi kendine tutuşturulmasından ibarettir. Bu yanma prosesi, NO_x ve partikül emisyonlarını önemli derecede azaltma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte yüksek termik verim ve yakıtların geniş bir yelpazesinin kullanılabilirliği söz konusudur. HCCI yanma prosesi, benzin kullanan bir buji ateşlemeli (SI) motorunun ve diesel yakıtı kullanan bir diesel motorunun en iyi özelliklerini belli bir noktaya kadar bir çatı altında toplama kabiliyetine sahiptir. Bir SI motordakine benzer şekilde yakıt ve hava, zengin karışımli difüzyon yanmasını bertaraf eden homojen karışımı elde etmek üzere karıştırılır ve böylece genelde klasik diesel yanma proseslerinde görülen partikül emisyonları azaltılabilir. Bir diesel motordakine benzer bir tutuşma vasıtasıyla HCCI motoru, klasik yanma proseslerinde görülen yüksek sıcaklık alevlerini bertaraf edebilen bir kendi kendine tutuşma prosesine tüm yanma odası boyunca maruz kalır. Bu nedenle HCCI motorlarında oluşan NO_x emisyonları, klasik yanma proseslerindeki değerleriyle kıyaslandığında çok düşük kalmaktadır. Ayrıca çok düşük bir denklik oranında ve harici egzost gazı tekrar sirkülasyonunun (EGR) yüksek bir seviyesinde ateş almama durumu söz konusu olmadan benzinli HCCI motorunun kelebeksiz (gaz keleşi tam açık konumda) olarak çalıştırılması mümkündür. Böylece çevrimden çevrime gerçekleşen çok küçük yanma farklılıklarının varlığında yüksek termik verim sağlanabilmektedir. Bu nedenle HCCI motoru ilgi uyandıran bir teknolojidir çünkü bu teknoloji, görünüşte diesel-vari termik verimi ve çok düşük emisyonları sağlayabilir ve böylece düşük sıcaklık ard işlem sistemlerine ihtiyaç duyulmadan emisyon kriterlerinin yerine getirilmesini mümkün kılabilir.

HCCI yanma, homojen karışımın piston ile sıkıştırılması suretiyle ÜÖN civarlarında homojen karışımın kendi kendine tutuşmasının sağlanması neticesinde elde edildiği için buji ateşlemeli (SI) motorlardaki kıvılcım ve diesel motorlardaki yakıt püskürtme zamanlaması gibi yanma başlangıcını direkt olarak kontrol eden klasik tip motorlarla kıyaslama yapıldığında motor çalışma koşullarının geniş bir aralığında bu yanma modu için yanma başlangıcı ve ısı açığa çıkış hızı kontrolünün çok daha uğraştırıcı bir konu olduğu görülmektedir. HCCI operasyonlarının ağır yüklerdeki gerçekleştirilebilirliği (performansı), kısa süreli çalıştırılmadaki problemler, aşırı düzeydeki HC ve CO emisyonları ve ilk hareket zorluğu diğer çözülmesi gerekli olan teknik konulardır.

HCCI yanma, ilk olarak iki stroklu içten yanmalı (IC) motorlar için bir alternatif yanma modu olarak düşünüldü (Onishi vd., 1979). Son on yılda bu teknolojinin araştırılması ve

geliştirilmesi hususunda büyük ilerlemeler kaydedildi. Bu ilerlemeler, yolcu taşıtları ve kamyonlar için yakıt ekonomisini artırma ve emisyonları daha fazla azaltma yönünde bu teknolojinin sahip olduğu yüksek potansiyele atfedilebilir.

Bu tez çalışmasında HCCI motorlarla ilgili yapılmış birçok araştırma hakkında kısa ve öz bilgi bulunabilir. Bu araştırmaların çoğu henüz tam olarak seri üretime hazır hale getirilememiş olmasına rağmen bu tür motorların Japon pazarı için seri üretimine geçilmiş olan iki tipi (MK ve UNIBUS) bulunmaktadır.

2. BENZİN YAKITLI HCCI MOTORLAR

2.1 Genel Tanımlama

HCCI motorlar, klasik bir buji ateşlemeli (SI) motor ile kıyaslandığında yakıt ekonomisinde %15 ila %20 arasında artış ve NO_x emisyonlarında azalım sağlamaktadır. En temel şekliyle HCCI motorlarında yanma, bir alev cephesi oluşturulmadan (oluşmadan) homojen yakıt/hava karışımlarının kontrol altında tutulmasına (Etkin Değişken Supap Zamanlaması olarak nitelendirilen FVVT vasıtasıyla) bağlı olarak kendi kendine tutuşması şeklinde tanımlanabilir. Enerji açığa çıkış hızını uygun seviyelerde kontrol için motor yüksek seviyede seyreltik çalıştırılmak zorundadır. Seyreltim seviyeleri yeterince yüksektir ki motor aslında kelebeksiz (gaz kelebeği tam açık konumda) çalıştırılmaktadır. Bu durum önemli derecede azalmış pompalama işi (kaybı) ve dolayısıyla yakıt ekonomisinde iyileşme ile sonuçlanır. Dolgu seyreltiminin büyük miktarları aynı zamanda yanmış gazın pik sıcaklığını azaltır. Bu durum sırasıyla kapalı-çevrim ısı kayıplarının azalmasına ve indike ısıl verimin artışına neden olur ki bir diesel motorun sahip olduğu değerlere yaklaşmaktadır. Bununla birlikte bir diesel motordan farklı olarak HCCI yanma prosesi, karışımın her tarafında aşağı yukarı homojen bir şekilde gerçekleşmektedir. Hiçbir şekilde yakıt-zengin (zengin karışimli) difüzyon yanması gerçekleşmediği için partikül emisyonları sıfır seviyesi civarındadır. NO_x emisyonlarında ki azalma azalan yanmış gaz sıcaklıklarından kaynaklanır ve NO_x emisyon seviyeleri kademeli dolgulu (SI) veya diesel motorların emisyon seviyelerinin tamamen altındadır. Gerçekten bir HCCI motoru, bir diesel motoru ile kıyaslanabilir yakıt ekonomisi potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda HCCI motoru, ard işlemlili klasik bir SI motorunun egzost borusu çıkışı NO_x emisyonlarıyla hemen hemen aynı NO_x emisyonlarını üretmektedir.

HCCI yanmasının potansiyel yararları çokken bu yanma modu, yüksek hidrokarbon ve CO emisyonları, dar bir çalışma rejimi ve yanma fazının kontrol zorluğu şeklinde bir problem serisi ortaya çıkarır. Bütün homojen dolgulu yanma sistemlerinde silindir içindeki yakıtın önemli bir kısmı, sıkıştırma stroku sırasında yarıklarda birikir ve yanma olayından kurtulur. Bununla birlikte geleneksel SI motorlarından farklı olarak yanmış gaz sıcaklıkları çok düşüktür. Yanmış gaz sıcaklıkları genişleme stroku sırasında silindire tekrar giren yanmamış yakıtın çoğunu tüketemeyecek kadar düşüktür. Bu durum klasik SI motorlara göre hem hidrokarbon hem de CO emisyonlarındaki önemli bir artışla sonuçlanır. Ard işlem prosesinin verimsiz olmasına neden olan düşük egzost gaz sıcaklıklarında problem artar. Ayrıca düşük yüklerde yanmış gazın pik sıcaklıkları CO' dan CO₂ oksidasyonunun tamamlanabilmesi için çok düşüktür (1500 K' den daha düşük) ve yanma verimi çok hızlı bir şekilde bozulur

(Dec, 2002). Yanma verimindeki bu kayıp tutuşma zorluklarıyla birleştiğinde en düşük yüklerde HCCI yanmasının tesirliliğini sınırlar. Daha ağır yüklerde motora emilen arttırılmış hava akışı silindir içindeki art gazların yerini alır ve yanma hızını azaltmak için yetersiz dolgu seyreltisi söz konusudur. Daha ağır yüklerde basınç artış hızları çok büyük olmaktadır ki motor gürültüsü önemli derecede artar ve kontrol edilmemiş olarak bırakılırsa motor hasar görebilir (Eng, 2002b). Sonuç olarak binek taşıt uygulaması için herhangi pratik HCCI motoru doğal olarak bir çok-modlu motor gibi çalışacaktır. Çalışma rejiminin ortalarında motor HCCI yanmasını kullanacak ve daha ağır ve düşük yüklerde motor klasik SI veya diesel yanmasından birine geçecektir. Belki de en uğraştırıcı konu motorun yük ve hız aralığı boyunca yanma fazının kontrol edilmesidir. Kendi kendine tutuşma zamanlaması sıkıştırma prosesi sırasında dolgunun basınç-sıcaklık-bileşim kompozisyonuyla kontrol edilir. Bu nedenle, optimum kendi kendine tutuşma zamanlamasını elde etmek üzere emme supabı kapandığındaki sıcaklığın ve karışım bileşiminin tam kontrolü gerekir. Kısa süreli motor çalışması sırasında gerekli seviyede kontrolü sağlamak zordur ve geleneksel SI yanmasından farklı olarak direkt yanmayı başlatan hiçbir araç yoktur. Bu da şu demektir; emme supabı kapandığında eğer dolgunun ısı koşulları ve bileşimi doğru değilse ateş almamayı önlemek üzere hiçbir kolayca işe yarar çare yoktur.

Eninde sonunda düşük yüklerde yanma fazını ve ağır yüklerde ana enerji açığa çıkış hızını kontrol edebilme becerisi başarılı HCCI motor gelişimine çözüm olacaktır. Bu hedeflere ulaşmak için bir takım işe yarar opsiyonlar varken, bu hedefler ağır yük operasyonu için temel motor, yakıt ve yanma modu tercihleriyle sağlanacaktır. Diesel motorları ve diesel yakıtı için düşük yüklerde kendi kendine tutuşmayı kolaylaştırmak üzere yüksek sıkıştırma oranları (>15:1) ve yanma fazını kontrol etmek üzere silindir içerisine direkt yakıt püskürtülmesi kullanılabilir. Bununla birlikte diesel yakıtının düşük uçuculuğu üst ölü noktadan önce tamamen kendi kendine tutuşma doğal eğilimi ile birleştiğinde partikülsüz yanma için gereken homojen karışım oluşturmayı zorlaştırır. SI motorları ve benzin yakıtı için var olan problemler bir diesel motorununkinin tam tersidir. Benzinin uçuculuğu homojen karışım oluşturulmasını bir dereceye kadar kolaylaştırır fakat yakıtın yüksek oktan sayısı düşük sıkıştırma oranlarıyla (<12:1) birleştiğinde düşük yüklerde kendi kendine tutuşmanın başarılmasını zorlaştırır. Yüksek oktan sayısı ve düşük sıkıştırma oranı tam-yük çalışmasında vuruntulu yanmayı önlemek üzere gereklidir. Böylece SI motorlarında erişilebilen düşük sıkıştırma oranlarında kendi kendine tutuşma için gereken sıcaklıkları elde etmek üzere dolgu ısıtmasının bazı yöntemleri gereklidir. Egzost gazından tekrar enerji kazandırmak üzere değişken supap hareketi kullanılabilirken ne kadar enerji elde edilebileceğinin limitleri vardır

(Law vd., 2000). Çünkü motor dolgu seyreltiminin yüksek seviyeleri ile kelebeksiz çalıştırılırken en düşük yüklerde kendi kendine tutuşmayı elde etmek için yeterli ısıl enerji egzost gazında mevcut değildir (Ohnishi vd., 1979). Boşta veya boşa yakın yük seviyelerinde HCCI yanmasını başarmak için ehemmiyetli araştırma gerekecektir. Düşük yükteki çalışmada oluşan problemleri tamamen önlemek üzere hibrid tahrik sistemi kullanımını, değişken sıkıştırma oranları kullanımını ve yakıtı modifiye ederek yakıt reaksiyon kinetiğinin değişimini kapsayan teknolojiler ve çözümler önerildi.

2.2 HCCI Yanma Tarihçesinin İncelenmesi

HCCI yanma başlangıçta iki stroklu içten yanmalı motorlar için bir alternatif yanma modu olarak keşfedildi (Onishi vd., 1979). Daha yüksek yakıt ekonomisi elde etme gayretleri otomotiv sanayisinde bu yanma moduna olan ilgiyi yeniden körükledi. Bu yanma modu binek taşıtları ve kamyonlar için düşük emisyon ve yüksek yakıt ekonomisi potansiyeline sahiptir. HCCI yanma prosesi literatürde çeşitli isimlerle anılmaktadır. HCCI yanma prosesinin ilk pratik uygulaması, HCCI yanma modunun iki stroklu motorların çalışmasını iyileştirmek üzere kullanılabileceği fark edildiğinde Onishi vd. (1979) tarafından gerçekleştirildi. İki stroklu motorların dezavantajları, düşük yüklerde yüksek miktarda art gaz ve motor durdurulduğunda (kontak kapatıldığı halde diğer bir deyişle ateşleme kesildikten sonra) yanmanın devam etme eğiliminde olmasıdır. Onishi ve yardımcıları hem iç art gazların yüksek seviyelerine hem de yüksek ilk dolgu sıcaklıklarına dayanan bir yanma modu tasarlayarak yukarıda ki olumsuzlukları güce dönüştürdüler. Silindir içindeki dolgunun kendiliğinden tutuşmasıyla sonuçlanan koşulların yaratılmasıyla emisyonlarda önemli azalmaların ve yakıt ekonomisinde iyileşmenin elde edilebileceğini buldular. Bu yanma modunu “aktif termo-atmosferik yanma” veya ATAC diye adlandırdılar. Düşük yüklerde iki stroklu motorların diğer bir problemi de yüksek çevrimsel değişkenliğe sahip olmalarıdır. Motor ATAC yanma modunda çalışırken çevrimden çevrime yinelenebilirlik daha iyi hale geldi. Bir optik motorda yanma prosesini gözetleyerek şunu buldular; bu yanma modunda oda boyunca yayılan hiçbir ayırt edilebilir alev cephesi yoktur. Yerine, yanma sırasında tüm odanın her tarafında aşamalı (kademeli) yanma reaksiyonlarının ve yoğunluk varyasyonlarının mükemmel bir modelini gözlemlediler.

Onishi vd. HCCI yanmanın elde edilmesi için kritik parametreleri şöyle tanımladı; 1) kendi kendine tutuşma için yeteri kadar yüksek sıcaklıkları elde etmek üzere yüksek seviyede seyreltim, 2) art gaz ve taze dolgu arasında uniform karışım, 3) çevrimden çevrime yinelenebilir dolgu değişimi. Onishi, art gaz ile yüksek seviyede karışım elde etmek üzere

dolgu değişimi kesatine bir transfer manifoldu ekledi. Böylece silindir içinde daha yüksek hızlar ve daha iyi karışım elde etti. HCCI operasyonu en düşük yüklerde veya ağır yükte sağlanamadı. Her ne kadar düşük yüklerde art gazların büyük miktarları varsa da, egzost gaz sıcaklığı düşüktür ve sıkıştırma sırasında neticelenen kütle averaj sıcaklığı kendi kendine tutuşmayı başlatmak için yeteri kadar yüksek değildir. Benzer şekilde ağır yüklerde ilave taze dolgu art gazların yerini alır ve yine sıcaklık kendi kendine tutuşmayı sağlamak için yeteri kadar yüksek değildir. Kararlı HCCI yanma, yine de bu düşük ve ağır yük sınırları arasında 1000 d/dak.' dan 4000 d/dak.' ya kadar uzanan motor hız aralığında 7.5:1' luk sıkıştırma oranıyla benzin kullanılarak sağlanabildi. Bu öncü çalışma NiCE' de doğrudan doğruya pratik uygulamaya konuldu. 10GC motoru bir stasyonel jenaratör olarak piyasaya sürüldü.

NiCE' de gerçekleştirilen çalışmayla aynı zamana rastlayan bir deneysel çalışma Toyota' da HCCI yanma üzerine gerçekleştirildi (Noguchi vd., 1979). Karşı pistonlu iki stroklu bir motorda HCCI yanmanın spektroskopik analizini gerçekleştirdiler. NiCE grubu tarafından elde edilen neticelere benzer şekilde Noguchi vd., kısmi-yük koşullarında iki stroklu motorlara HCCI yanmanın oldukça uygun olduğunu buldular. Motor HCCI modunda çalıştırıldığı esnada bir uçtan bir uca yanma hızları çok hızlıydı, yanma son derece düzgündü ve motor, mükemmel yakıt tüketimini ve düşük emisyonları sağladı. Optik araştırmalarla silindirin her tarafında birçok noktada tutuşmanın gerçekleştiğini ve yanma sırasında hiçbir ayırt edilebilir alev cephesi gözlenmediğini notlarına geçirdiler. Ara ürünleri ortaya çıkarmak üzere spektroskopik metotların kullanılmasıyla kendi kendine tutuşma olayından önce silindir içerisinde CH_2O , HO_2 ve O radikallerinin yüksek seviyeleri ölçüldü. Bu ara ürünler, daha büyük bir oranı parafinik hidrokarbon olan yakıtların düşük sıcaklıkta kendi kendine tutuşma kimyasının karakteristiğidir. Tutuşma gerçekleşikten sonra CH , H ve OH radikallerini yüksek yoğunlukta gözlemler. Bu radikaller, ana yanma sırasında yüksek sıcaklık kimyasının göstericisidirler. Bu ara ürün değerleri, geleneksel SI motor yanmasında (operasyonunda) gözlenenlerden önemli derecede farklıdır. Daha doğrusu bu değerler, son gazın kendi kendine tutuşması ve vuruntusu ile iştirakli ara ürünleri daha fazla anımsatmaktadır. Bu durum, bir SI motordaki kendi kendine tutuşma ve HCCI yanma arasındaki benzerliklerin daha ileri kanıtıdır.

İki stroklu motorlardaki önceki çalışmaya dayandırarak Najt ve Foster (1983) çalışmayı dört stroklu motorlara yaydı. HCCI yanmanın temel fiziğini daha fazla anlamak için çalıştılar. Deneyle bir dizi motor hızında ve seyreltim seviyesinde parafinik ve aromatik yakıtların karışımlarıyla gerçekleştirildi. Motor, iki stroklu motorlardaki iç art gazların faydası olmadan çalıştırıldığı için HCCI yanmasını elde etmek üzere emme havası, yüksek sıcaklıklara

ısıtılmak zorundadır. Basınç datasının ısı açığa çıkış analizi ile birlikte basitleştirilmiş kimyasal kinetik modellemeyi kullanarak HCCI yanma prosesinin “tutuşma” ve “ana enerji açığa çıkışı” şeklinde iki yarı-bağımsız prosese ayrılabilceğini gösterdiler. Kendi kendine HCCI tutuşmasının, SI motorlarda vuruntu ile sonuçlanan benzer düşük sıcaklık (1000 K’ den aşığı) kimyası ile kontrol edildiğı ve ana enerji açığa çıkışının, CO oksidasyonu tarafından domine edilen yüksek sıcaklık (1000 K üzeri) kimyası ile kontrol edildiğı sonucuna vardılar. Sadece kimyasal kinetiklere (reaksiyon mekanizmalarına) dayandırılan bir korelasyonu enerji açığa çıkış hızı için geliştirdiler. Bu korelasyon, sıkıştırma oranı, denklik oranı, seyreltim seviyesi, motor hızı ve yakıt tipi değışikliklerine HCCI yanma prosesinin gözlemlenen cevabını açıkladı. Bu sonuçlara ve Onishi ve Noguchi’ nin önceki çalışmasına dayandırarak HCCI yanmanın silindir içindeki dolgunun bileşimi, basıncı ve sıcaklığı ile kontrol edilen bir kimyasal kinetik yanma prosesi olduğı sonucuna vardılar. Alev yayılımını kullanan geleneksel bir SI motorundan ve yakıt/hava karışımına çok bağımlı diesel yanmasından farklı olarak, Najt ve Foster HCCI yanmanın bir karışım kontrollü yanma prosesi olmadığı sonucunu çıkardılar. Daha doğrusu bir HCCI motorunun sıkıştırma tutuşmalı bir karışım kimyasal reaktörü gibi davrandığı sonucuna vardılar. Ayrıca HCCI yanmanın tutuşma prosesinin kontrolsüzlüğünden ve sınırlı çalışma aralığından dolayı olumsuzluk yaşadığını not ettiler. Bunlar iki stroklu HCCI motorlarda Onishi ve Noguchi tarafından tanımlanan benzer problemlerdi. Bundan başka karışımı seyreltmek için harici egzost gazının tekrar sirkülasyonu (EGR) kullanıldığından beri, kendi kendine tutuşmayı başlatacak olan aktif radikallerin silindir içerisinde tekrar çevrime katılmalarının küçük bir olasılığı söz konusudur. İki stroklu motorlarda radikaller HCCI yanmasında rol alabilmekte iken, kendi kendine HCCI tutuşmasını sağlamak için onlara ihtiyaç olmadığını bu çalışma gösterdi.

Thring (1989), tam karışımlı benzin ile çalışan bir HCCI motorunun performansını inceleyerek Najt ve Foster’ ın dört stroklu motorlardaki çalışmasını daha ileri taşıdı. Tek silindirli motorun çalışma rejimi, hava/yakıt denklik oranının ve harici EGR miktarının bir fonksiyonu olarak ayrıntılı olarak düzenlendi. HCCI operasyonunun sınırlamaları tekrar not edildi: çalışma rejimi kısmi-yük operasyonu ile sınırlıdır ve kendi kendine tutuşma zamanlamasının kontrolü problemlidir. Bu incelemede HCCI yanma modunun potansiyel olarak bir motor çalışma stratejisine entegre edilebileceğı önerildi. Bu durumda motor, kısmi yüklerde HCCI yanmasıyla çalışır ve ağır yüklerde SI alev yayılımına geçer.

2.3 Benzinli HCCI Yanmasına Bakış

Her ne kadar HCCI yanma 20 senenin üzerindeki bir zaman zarfında araştırılmakta ise de, bu yanma modu hakkında cevapsız kalmış bazı temel sualler hala vardır. Art gaz ve taze dolgu arasındaki karışimsızlığın tesiri bilinmemektedir. İki stroklu motorlarda dolgunun kademelendirilmesinin kendi kendine tutuşma zamanlaması ve yanma üzerine büyük bir etki ortaya koyduğu açıkça görünürken dört stroklu motorlardaki tesiri daha az anlaşıldı. Diğer bir bilinmeyende karışım hareketinin ve türbülansın ana yanma hızı üzerine etkisidir. Her ne kadar dört stroklu motorlarda HCCI yanmanın kimyasal kinetiklerle (reaksiyon mekanizmalarıyla) domine edildiğine dair yeterli delil varsa da (Najt vd., 1983; Aceves vd., 2000) karışımın ve türbülansın HCCI yanmasında önemli bir rol oynadığını gösteren bazı modellemeler ve deneysel sonuçlar mevcuttur (Kong vd., 2001; Christensen vd., 2002a; 2002b). Eğer karışımın hareketi ve türbülans HCCI yanmasında önemli bir rol almakta ise yanma prosesini kontrol etmenin bir çaresi olarak kullanılabilirler (Lavy vd., 2000).

İki stroklu motorlarda HCCI yanmanın sağlanmasında art gazların önemi ilk olarak Onishi tarafından farkına varıldı. Onishi ve yardımcıları kararlı HCCI yanmanın sağlanabilmesi için silindir dahilinde üniform dolgu karışımına sahip olmanın önemli olduğunu savundular ve üniform bir karışım elde edilmesine yardım etmesi için motorun emme manifoldu üzerine uzun bir transfer kanalı dizayn ettiler. Diğerlerinin müteakip çalışması HCCI yanmanın aynı zamanda egzost borusu veya emme transfer manifoldundaki kelebek hareketleriyle sağlanabileceğini meydana çıkardı (Duret vd., 1996; Ishibashi vd., 1996). Gentili vd. (1997), seri üretim bir NiCE motorunda HCCI yanma üzerine emme ve egzosttaki kısılmaların tesirini araştırdı. Motor, transfer manifoldları üzerindeki orifis disklerle (orifice plates) çalıştırıldığında yanma zamanlamasının iyileştirilmiş ve yanma süresinin azalmış olduğunu buldular. Buradan hareketle transfer manifoldları boyunca akış hızının önemli olduğu ve HCCI yanmanın dolgunun karışimsızlığından etkilenebileceği sonucuna vardılar. Taze dolgu ve art gazın homojensizliği silindir içerisinde lokal olarak yüksek sıcaklıklarla sonuçlanmaktadır. Bu lokal sıcaklıklar kendi kendine tutuşmayı başlatmaya yardımcıdır. Müteakip hesaba dayanan akış dinamiği (CFD) modelleri, orifis diskler kullanıldığında ısıl kademelendirmenin geniş bir yelpazesinin meydana getirildiğini gösterdi (Lavy vd., 2001). Hesapsal sonuçlara dayanarak HCCI yanmanın daha yüksek motor hızlarında sağlanamama sebebini tartıştılar. Sebep homojen karışımı oluşturan daha fazla karışım olmasıdır ve bu nedenle kendi kendine tutuşma sağlanamamaktadır. Bununla birlikte bu iddiayı desteklemek üzere hiçbir direkt deneysel kanıt temin edilemedi. Daha yüksek motor hızlarında kendi kendine tutuşmanın elde edilmesindeki becerisizlik Najt ve Foster' ın açıkladığı şu gerçekten

dolayıdır. Düşük sıcaklık reaksiyonlarının gelişiminin tutuşmayla sonlanması için silindir içerisinde yeterli ikame süresi yoktur.

2.3.1 Karışım Homojensizliğinin Etkisi

İki stroklu motorlarda HCCI yanması üzerindeki ısıl kademelendirmenin ve karışimsızlığın rolü şu tahmine götürdü. Karışım homojensizliği dört stroklu motorlarda HCCI yanmasını kontrol etmek için bir anahtar unsundur. HCCI yanma üzerine karışım homojensizliğinin etkilerini araştırmak üzere deneye ve hesaba dayanan önemli çabalar sarf edildi. Dört stroklu bir motorda HCCI yanmasının direkt gözlemi 35 oktan sayılı bir ana referans yakıt (PRF) karışımını kullanan tek silindirli bir motorda gerçekleştirildi (Richter vd., 2000). Yakıt hazırlanışının yanma üzerine etkilerini araştırmak için ön karışımli önceden buharlaşmış yakıt ile ve ayrıca manifolda yakıt püskürterek deneyler gerçekleştirildi. Yakıt dağılımının görünümü iki farklı yakıt hazırlama stratejisi arasında önemli farklılıklar olduğunu gösterdi. Manifolda yakıt püskürtme stratejisi kullanıldığında silindir içerisindeki homojensizlikler 4 ila 6 mm kabilinden ölçüldü. Ön karışımli strateji de ise silindir içerisinde hiçbir önemli homojensizlik ölçülmedi. Bununla birlikte silindir içindeki OH radikal dağılımlarının kıyaslamaları iki yakıt hazırlama modu arasında herhangi bir önemli farkı göstermedi. Araştırmacılar karışimsızlığın HCCI yanması üzerine sadece orta seviyede bir tesire sahip olduğu sonucuna vardılar.

HCCI yanmasına art gazların ve yakıt dağılımının etkileri araştırıldı (Zhao vd., 2001). 50 oktanlı PRF yakıt karışımı ile çalışan tek silindirli bir motordaki yakıt dağılımını ölçmeyi umarak planer lazerle-indüklenmiş fluoresans (PLIF) kullandılar. Silindir kafası yüksek seviyede türbülans meydana getirmek üzere dizayn edilmiş emme manifoldlarına sahipti ve tekabülünde silindir içindeki yakıt dağılımında geniş gradyenler gözlemlendi. Her ne kadar yakıtın çoğu yanma odasının çevresi etrafında bulunmakta ise de kendi kendine tutuşmanın daima silindir merkezinde başladığı gözlemlendi. HCCI prosesindeki yakıtın kendi kendine tutuşmasında art gazın ana etkisinin termal olduğu ve dolgu seyreltiminin en önemli tesirinin ana yanmada olduğu sonucuna vardılar. Deneylerle birlikte numerik modelleri kullanarak, tekrar çevrime katılmış olan egzost gazı ara ürünlerinin yanma (tutuşma) üzerinde hiçbir kimyasal etkisi olmadığı sonucuna vardılar.

Doğal gazın HCCI yanması üzerine EGR homojensizliğinin etkisi araştırıldı (Morimoto vd., 2001). Deneyler tek silindirli bir diesel motorunda 17:1' lik bir sıkıştırma oranında gerçekleştirildi. EGR motora girmeden önce harici olarak soğutuldu. EGR' nin kötü dağılımının etkisini motorun yukarı kısmındaki bir karışım tankının içine EGR' nin verildiği

homojen durum ile, emme manifoldunun hemen yukarı kısmından EGR' nin verildiği homojen olmayan durumdaki motor performanslarını kıyaslayarak anladılar. Homojen olmayan EGR ile kendi kendine tutuşma zamanlaması hafifçe iyileşti ve $10^\circ - 90^\circ$ krank açısı yanma süresi uzadı. İyileşmiş (öne çekilen) tutuşma zamanlamasının karşılığı olarak motorun indike ortalama efektif basıncı (IMEP) yükseldi. Karışım homojensizliğinin HCCI yanması için tesirli bir kontrol aracı olarak kullanılabileceği sonucuna vardılar.

HCCI yanması ve emisyonlar üzerine yakıt homojensizliğinin tesiri deneyler serisiyle araştırıldı (Girard vd., 2002). Deneyler hem metanı hem de propanı yakıt olarak kullanan 16:1 sıkıştırma oranlı tek silindirli bir motorda gerçekleştirildi. Yakıt homojensizliğinin etkisi, yakıt tamamen motorun yukarı kısmındaki karışım tankına püskürtüldüğünde (homojen durum) ve yakıt emme manifolduna püskürtüldüğünde (homojen olmayan durum) elde edilen sonuçların motor performansları kıyaslanarak dolaylı olarak anlaşıldı. Her ne kadar NO_x emisyonları %50 oranında, HC ve CO emisyonları %25 oranında arttı ise de IMEP, karışım homojensizliği ile değişmedi. Bir motor simulasyon modeli, nitel olarak benzer eğimler gösterdi çünkü yanma fazı homojensizliğe duyarsızdı. Oysa öngörülen NO_x emisyonları artan karışimsızlıkla yükseldi.

2.3.2 Türbülansın Etkisi

HCCI prosesindeki yakıtın kendi kendine tutuşması ve yanması üzerine karışımın silindir içi türbülansının etkilerini direkt olarak ölçmek için pek çok deney gerçekleştirildi. HCCI yanmasına yanma odası geometrisinin etkileri deneysel olarak araştırıldı (Christensen vd., 2002a). Yanma odası içerisindeki türbülans miktarlarını değiştirmek üzere farklı olarak biçimlendirilmiş iki tip piston ile tek silindirli bir motorda deneyler gerçekleştirildi. Pistonlardan birinin tepesi düzdü ve diğer pistonun tepesinde kare şeklinde bir oyuk vardı. Tepesi oyuk piston ile ÜÖN civarlarında yüksek seviyede türbülans meydana getirildi. Deneyler sabit bir motor hızında gerçekleştirildi ve emme havası sıcaklığı $60^\circ C$ ' den $200^\circ C$ ' ye kadar değiştirildi. Kullanılan yakıt 50 oktan sayılı bir PRF karışımı idi. Aynı yanma fazında oyuk piston için giriş havası sıcaklığı düz piston için gerekli sıcaklıklardan $20^\circ C$ daha düşüktü. Bu durum şunu gösterir; türbülansın kendi kendine tutuşma üzerine olan etkisi (tutuşmayı kolaylaştırarak) sıcaklık gereksinimini azaltma yönündedir. Bununla birlikte oyuk piston için yanma süresi daha uzundu. Araştırmacıların düşündüğü ise türbülansın toplam yanma süresini arttırmaktan ziyade azaltma yönünde iş göreceği şeklindeydi. Oyuk piston dizaynı daha fazla piston tepesi alanı sağlar. Bu durum her zaman şu anlama gelir; oyuk piston yüzey sıcaklığı, normal bir pistonunkine göre epeyce yüksektir. Oyuk pistonun

daha yüksek yüzey sıcaklıklarının tutuşmayı kolaylaştıracağı öngörülmektedir. Oyuk pistonun daha fazla olan türbülansının aynı zamanda yanma sırasında gazdan olan ısı transferini arttırması ve tekabülünde yanma süresini uzatması söz konusu olabilir.

Türbülansın ısı transferi üzerine karmaşık etkilerinden dolayı karışım hareketinin ve türbülansın HCCI prosesindeki yakıtın kendi kendine tutuşması ve yanması üzerine tesirini deneysel olarak belirlemek zordur. Türbülans arttığında silindirden olan ısı transferi artar ve birileri kendi kendine tutuşmanın ve yanmanın gecikeceğini öngörmektedir. Karışım hareketinin yanma üzerine etkilerini açıkça anlamak için birisinin aynı zamanda karışım hareketinin ısı transferi üzerine etkilerini belirlemesi gereklidir. Benzer şekilde literatürde karışimsızlığın HCCI prosesindeki yakıtın kendi kendine tutuşmasını ve ana yanma hızını hangi mertebede etkilediği açık değildir. Karışimsızlığın yanma üzerine etkilerini açıkça anlamak için birileri karışimsızlığın büyüklüğünü ve yapısını tam olarak karakterize etmek zorundadır.

2.4 Benzinli HCCI Motorunun Gelişimi

Benzinli HCCI yanma arttırılan sıkıştırma oranlarını veya yükseltilemiş emme havası sıcaklıklarını kullanarak gelişim gösterirken bu durum, bir motorda HCCI yanma kavramının pratik olarak yerine getirilmesini temsil etmemektedir. Binek taşıtları için bir benzinli HCCI motoru geliştirilirken motorun çok yüksek sıkıştırma oranları veya harici dolgu ısıtması olmadan çalışması gereklidir. Ciddi vuruş sınırlamaları olmadan uygun tam-yük çalışması elde etmek üzere bir benzinli motordaki maksimum sıkıştırma oranı 12 ~ 12.5' la sınırlıdır. Soğutma maddesinin (soğutma suyunun) veya egzost gazının atık enerjisini tekrar kazandırarak ve ısı değiştiricileri kullanılarak emilen dolgunun sıcaklığını yükseltmek mümkünken bundan sonra bu yoldan sağlanan HCCI çalışma rejiminde emilen dolgu sıcaklığının yükseltilebilirliğinin bir limiti vardır (Li vd., 2001). Dolgu sıcaklığını yükseltmenin en verimli yolu iç art gazların yoğun olarak kullanılmasıdır. Bu yol iki stroklu motorların çok düşük yüklerde HCCI yanma ile çalışmasına olanak sağlayan anahtar unsurlardan biridir. Dört stroklu motorlardaki HCCI yanma, silindir içindeki dolgu sıcaklığını ve karışım bileşimini kontrol için bir dizi farklı seyreltim stratejilerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır.

HCCI yanmanın en önemli zorluğu, hem kendi kendine tutuşma zamanlamasını hem de yanma süresini kontrol etmek için yakıt püskürtme zamanlaması ve supap olayları gibi mevcut mekanik metotları kullanmasıdır. Tek silindirli motorlarda bu metotlar zorlukla sınanırken karşılaşılan zorluklar, çok silindirli motorlarda soğutma maddesi sıcaklığındaki,

silindir kafası ve piston sıcaklıklarındaki ve silindirler arasında EGR dağılımındaki dengesizlikler nedeniyle artar. Kısa süreli motor operasyonu için geliştirilen teknikler hatta daha fazla uğraştırıcı olacaktır. Bu zorluklar yüzünden HCCI motorunun en iyi uygulanma şeklinin hibrid taşıt serisinde bir elektrik motoru ile ortak çalıştırılması gibi gözükmemektedir. Hibrid uygulamada maksimum verim elde etmek için motor ağır yüklerde çalıştırılır. Bununla birlikte ağır yükte bir SI motorunun gaz keleşi fazlasıyla açıldığı için HCCI yanma prosesinin SI yanmasına göre verim avantajı ortadan kalkmaktadır. Ayrıca ağır yükte HCCI yanma prosesinin artan basınç artış hızları ve yüksek motor gürültüsü gibi iyi bilinen problemleri söz konusudur. Ayrıca ağır yük koşullarında pik sıcaklıklar yükselir ve NO_x emisyonları SI yanma seviyesindekiye yakın artar. Bu sebeplerden bir HCCI motoru seri hibrid uygulamaları için tam olarak uygun değildir.

HCCI yanmanın tüm verim ve emisyon yararlarını elde etmek üzere motor, SI motorunun gaz keleşinin fazlasıyla kısık olduğu koşullarda çalıştırılmak zorundadır. Ayrıca motor taşıt üzerinde kısa süreliliklerle çalışmak zorundadır. Bu sebepten düşük yüklerde güçlü, kontrol edilebilir benzin yanmasına olanak veren teknolojilerin sağlanması HCCI motor gelişimi için çok önemlidir. HCCI kontrol problemleri şu gerçeğe açıklanabilir; güvenilir olan ateşleme zamanlaması, yanma fazını değiştirerek en iyi termik verimi temin etmek için artık kullanılamamaktadır. Direkt püskürtmeli HCCI motorlarda yakıt püskürtme zamanlamasının bir dereceye kadar kontrol sağladığı görüldüğü halde bu uygulama, tüm çalışma aralığında yeterli olmayabilir (Marriott vd., 2002a).

Akıldaki bu sınırlamalar ve problemlerle bu bölüm, benzinli bir HCCI motorunun geliştirilmesi için önemli sualleri ve ilgili konuları tartışacaktır. Motor yapısı ve çalışma prensibi terimleriyle önemli sualler şunlardır:

- (1) Benzinli HCCI yanmasını mümkün kılmak için hangi seyreltim stratejisi en iyi işler?
- (2) Bir optimum sıkıştırma oranı var mıdır?
- (3) Bir HCCI motoru DI yakıt püskürtmesini kullanmalı mı?
- (4) Kısa süreli çalışmalar sırasında (HCCI modunda) yanma fazı nasıl kontrol edilir?
- (5) HC ve CO emisyonlarını kontrol etmek üzere klasik bir katalizör kullanılabilir mi?

2.4.1 HCCI Motor Operasyonunun Gereklere

Uygulanabilir bir motorda HCCI yanma fikrinin geliştirilmesi için en önemli sebep şudur; çünkü bu motor tipi regule edilen seyir çevrimlerinde yakıt ekonomisi ve NO_x emisyonları bakımından fayda göstermektedir (U.S. FTP, Avrupalılara ait NEDC ve Japonlara ait 10-15 mod çevrimi). Motor kontrol problemleri ışığı altındaki önemli gelişim gayretleri piyasaya bir

HCCI motorunu sürme gerekliliğini doğurdu. Bu motorlar, fiyat etkili olmakla beraber her biri kendi seyir çevriminde fayda sağlamalıdır. Bir HCCI motorunu FTP çevriminde çalıştırmak için motor mod değişim operasyonunu kullanabilmek zorundadır. Yakıt ekonomisinde önemli kazanımlar aynı zamanda taşıtın yavaşlaması sırasında yakıtın kesilmesiyle de sağlanabilmektedir. Bu nedenle HCCI ve SI yanma modları arasındaki değişimlere ilave olarak motor aynı zamanda yakıtın kesilmesi ve tekrar verilmesi prosesini kullanabilmek zorundadır. Motor çalışması esnasında farklı modların tümü arasındaki geçişleri idare etmek üzere kontrol algoritmalarının ve stratejilerinin tasarlanması zorunludur.

Çalışma alanının bir kısmında HCCI yanmasını kullanan bir motordan gelen potansiyel yakıt ekonomisi ve NO_x emisyonları yararlarını belirlemek için Avrupalılara ait NEDC çevrimi üzerinden bir taşıt simulasyonu gerçekleştirildi (Zhao vd., 2002). Motor performans datası, test çevriminin hız ve yük rejimi üzerinden HCCI ve SI operasyonlarından elde edildi. Klasik dört stroklu benzinli bir SI motorunun supap olayları değiştirilerek 1000 d/dak.' dan 4000 d/dak.' ya kadar uzanan motor hızlarında ve 0.5 bar ila 4.0 bar BMEP basınç aralığında başarılı HCCI operasyonunu sağlayabildiler. Motor 1' lik bir denklik oranı ile çalıştırıldı öyle ki klasik üç-ışlevli katalizör teknolojisi NO_x ve HC emisyonlarını azaltmak için kullanılabilirdi. Bu çalışma aralığında motor, ana hat manifolduna yakıt püskürtülen (PFI) motoruna göre yakıt ekonomisinde %30' dan fazla iyileşme ve NO_x emisyonlarında %99' a varan azalmalar gösterdi. Bununla birlikte araştırmacılar 60 °C' nin altındaki soğutma maddesi sıcaklıklarında, boşa yakın hızlarda ve yüklerde veya 3.5 bar BMEP ve 1500 d/dak' nın üstündeki yüklerde HCCI yanmasını sağlayamadılar. Bu nedenle motor, test sırasında 264 sn. boyunca HCCI yanma moduna geçemedi. Bu süre, NEDC çevrimi için toplam test süresinin çeyreğini temsil etmektedir. Bir kereliğine soğutma maddesi sıcaklığının 60 °C' den daha yüksek olmasıyla motorun, HCCI ve SI yanma modları arasında ani olarak değişim sağlayabileceği öngörüldü. NEDC çevrimi 8 hız ve yük noktası ile simule edildi. 8 test noktasının sadece 3' ü HCCI çalışma rejiminin dahilinde idi. Simulasyon noktalarının 4' ü HCCI operasyonunun işleyebileceği yüklerden daha düşük yüklerde idi. Bu sınırlamaların bir sonucu olarak spesifik kararlı-durum çalışma koşullarındaki büyük yararlar rağmen motorun performansını tüm NEDC sürüş çevrimi üzerinden simule ettiklerinde temel motora göre yakıt ekonomisindeki kazanımlar %5' den ve NO_x yararları %15' den daha azdı. Sürüş çevriminde CO emisyonları %4 azaltılırken HC emisyonları %17 arttı. Bu durum, tüm yakıt ekonomisi yararlarını sağlamak için düşük soğutma maddesi sıcaklıklarında ve daha düşük yüklerde HCCI operasyonunun gerçekleştirilmesi gereksinimini vurgulamaktadır.

2.4.2 Seyreltim Stratejileri

HCCI operasyonu için ana konu sıkıştırma strokunun sonuna doğru karışımın kendi kendine tutuşmasını başlatmak için yeterli ısı enerjisinin elde edilmesidir. Bunu, sıkıştırma oranı sınırlı bir benzinli HCCI motorunda gerçekleminin en pratik yolu tekrar sirküle edilen egzost gazlarının yüksek seviyelerinin kullanımı vasıtasıyladır. Düşük yüklerde iç art gazların yüksek seviyeleri, iki stroklu motorlarda HCCI yanma elde edilmesi için bir anahtar unsundur. Ishibashi vd. (1996), tek silindirli iki stroklu bir motorda HCCI yanmasını ve dolgu değişiminin seviyesini ayarlamak için bir değişken egzost manifoldu sınırlamasını kullandılar. Tekrar sirküle edilen egzost gazının seviyesini ayarlayarak motor çalışma sahasının üçte birinde başarılı olarak HCCI yanma fazını kontrol edebildiler. Fakat onlardan öncekiler gibi şunu buldular; boşa yakın yüklerde tekrarlanabilir HCCI yanmasını elde etmek için yeterli olmayan ısı enerjisi vardı ve orta-yükün üzerinde enerji açığa çıkış prosesini kontrol etmek için çok az dolgu seyreltisi vardı.

Dört stroklu motorlarda değişken supap hareketi ile iç art gazların yüksek seviyesini elde etmek için birçok stratejiler vardır. Geniş bir bakış açısıyla bütün supap stratejileri iki genel sınıfa ayrılabilir. Birinci sınıfta manifoldların biriyle motoru terk eden egzost gazı silindire tekrar girer. Bu olay egzostun tekrar teneffüs edilmesi stratejisidir. İkinci sınıfta silindir içerisinde egzost gazını tutmak için egzost strokunda egzost supapları erkenden kapatılır. Bu olay egzostun tekrar sıkıştırılması stratejisidir. Supap zamanlamalarının tekrar teneffüs etme stratejisi ile kullanılacak geniş bir aralığı mevcuttur. Egzost stroku sırasında emme manifolduna egzost gazının akması için emme supapları kısa bir süre için açılabilir. Egzost gazı daha sonra emme stroku sırasında bir sonraki taze dolgu ile silindire tekrar girer. Alternatif olarak art gazlı seyreltim, emme stroku sırasında egzost supaplarının tekrar açılmasıyla sağlanabilir. Üçüncü bir opsiyonda egzost stroku boyunca ve aynı şekilde emme strokunda egzost supabını açık tutmaktır. Bu durum uzatılmış üst üste bindirme (supap bindirmesi) stratejisidir. Kıyaslama yapıldığında tekrar sıkıştırma stratejisinde kullanılabilen supap zamanlamalarının basit olduğu görülmektedir. Silindir içerisindeki art gazı tutmak üzere egzost strokun ÜÖN' sından çok önce egzost supabı tamamen kapatılır. Tekrar sıkıştırma sırasında pompala kayıplarını minimize etmek için emme supabının yeri, egzost supabı ile simetriktir.

Bu seyreltim stratejilerinin tümü deneyden geçti ve literatürde bulunabilir. Bir elektrohidrolik değişken supap işletim (VVA) sistemi kullanılarak HCCI operasyonu sağlandı. Bu HCCI operasyonu, emme stroku süresince egzost supabının açık kaldığı tekrar teneffüs etme stratejisini kullandı (Kaahaania vd., 2001). Allen vd. (2002), bir elektrohidrolik supap sistemi

kullandı. Bu sistemde hem egzostun tekrar sıkıştırılması stratejisini hem de egzostun tekrar teneffüs edilmesi stratejisini kullanarak iyi HCCI yanma performansı gösterdi. Zhao vd. (2002), aynı zamanda kendi HCCI deneylerinde egzostun tekrar sıkıştırılması stratejisini kullandı. Ishibashi vd.'nin (1996) iki stroklu deneyimlerine benzer şekilde yukarıdaki araştırmacılar, hız ve yük aralıklarında HCCI yanmasını kontrol etmek için art gazların seviyelerini başarılı olarak ayarlayabildiler. Bununla birlikte hiçbir seyreltim stratejisiyle boşa yakın yüklerde memnun edici HCCI yanması için yeterli ısı enerjisi elde edilemedi. Ishibashi vd.'nin (1996) sonuçlarına benzer şekilde HCCI operasyonu boşa yakın yüklerde problem olarak kalmaktadır. Azalan yük ile her çevrimde yanan yakıtın miktarı azalır ve egzost gaz sıcaklığı önemli derecede düşer. Böylece egzost gazındaki mevcut enerji azalan yük ile azalır. Düşük motor hızlarındaki artan ısı kaybı oranlarıyla tutuşmayı sağlamadaki bu enerji noksanlığı artar.

Termodinamik perspektif açıdan çeşitli seyreltim stratejileri arasında hiçbir önemli farklılık olmadığı ortaya çıkmaktadır. Law vd. (2000), egzost gazının tekrar sıkıştırılması stratejisini egzost gazının tekrar teneffüs edilmesi stratejisiyle kıyasladılar. Bu iki stratejinin silindir içindeki basınç profiline veya yanma karakteristiğine ait hiçbir önemli farklılık bulamadılar. Bununla birlikte pratik perspektif açıdan egzost gazının tekrar sıkıştırılması stratejisinin gerçekleştirilmesinin daha kolay olduğu ortaya çıkmaktadır ve literatürde tercih edilen stratejidir. Egzost gazının tekrar sıkıştırılması stratejisi, emme ve egzost supaplarının üzerindeki mekanik değişken iner çıkar ve faz sistemleriyle veya Law vd. tarafından kullanılan elektrohidrolik sisteme benzer bütünüyle esnek VVA sistemleriyle kolayca uygulanabilir. Elektrohidrolik supap işletim sistemleriyle egzostun tekrar sıkıştırılması stratejisi, egzostun tekrar teneffüs edilmesi stratejisine ilişkin harcanması (büyütülmesi) gereken hidrolik enerjiyi azaltır ve böylece toplam parazitik kayıpları da azaltır. Ayrıca ÜÖN' da egzost supapları kapalı olduğundan egzost gazının tekrar sıkıştırılması stratejisi, yüksek sıkıştırma oranlarındaki uzatılmış üst üste bindirme stratejisi ile ilgili piston-supap boşluk problemlerini önler.

2.4.3 Sıkıştırma Oranı

Benzinli bir HCCI motoru için optimum sıkıştırma oranının seçimi belirgin değildir. Sıkıştırma oranının yükseltilmesi, boşa yakın yüklerde benzinin kendi kendine tutuşmasının başlatılması için kesin bir çözüm olacak gibi görünürken iki önemli faktör bu duruma karşı koyar. Birincisi ağır yüklerde klasik SI yanmasını kullanan bir motor konseptine benzinli HCCI yanmasını entegre etme ihtiyacı sıkıştırma oranına pratikte bir sınırlama getirir. Klasik

benzinli SI motoru operasyonunda sıkıştırma oranlarını 12:1' in ötesine taşımak için herhangi bir teşebbüsün, gaz kelebeğinin tam açık konumunda ciddi vuruntu problemlerine götürmesi muhtemeldir. İkincisi sıkıştırma oranının yükseltilmesiyle HCCI yanma rejiminde çalışılırken yanma ile meydana gelen gürültü problemlerinde artış olması muhtemeldir. Sıkıştırma oranı arttırıldıkça silindir içindeki gaz sıcaklıkları ve aktif kimyasal ara ürün konsantrasyonları da artar. Bu artışlar esas itibariyle kimyasal reaktifliğin yüksek seviyelerine, iyileştirilmiş (öne çekilen) tutuşma zamanlamalarına ve pik enerjinin yüksek açığa çıkış hızlarına götürür. Böylece düşük motor hızlarında ve yüklerinde güçlü HCCI yanmasına imkan vermek için arttırılmış sıkıştırma oranının kullanılması potansiyeline rağmen arttırılmış sıkıştırma oranı, basınç yükseliminin ve yanma ile meydana gelen gürültünün aşırı oranları problemini şiddetlendirir. Basınç yükselimi ve yanma gürültüsü uygulanabilir HCCI operasyonu için üst yük sınırını tanımlar. Najt ve Foster (1983), PRF yakıt karışımları kullanarak bir dizi sıkıştırma oranıyla deneyler gerçekleştirdiler. Tutuşma gereksinimleri ve ana enerjinin açığa çıkış hızları arasında en iyi uzlaşmanın daha düşük sıkıştırma oranlarında elde edildiği sonucuna vardılar. Benzer şekilde Thring (1989), daha düşük sıkıştırma oranlarının düzgün HCCI operasyonuna daha çok uygun olduğunu buldu.

Değişken sıkıştırma oranı yukarıda ki probleme potansiyel bir çözüm olacak gibi görünmektedir fakat uygulanabilir değişken sıkıştırma oranı mekanizmalarının gerçekleştirilmesi zordur ve hiçbir uygulanabilir icat tanıtılmadı. Gerçekte var olan (fiili) sıkıştırma oranı emme supabının geç kapatılmasıyla azaltılabilirken bu durum, aynı zamanda azalan yer değiştirme hacmi (silindir hacmi) ve gaz kelebeğinin tam açık konumunda önemli bir tork kaybı ile sonuçlanır. Ayrıca Christensen vd. (1999a), bir HCCI motorunun yanma veriminin artan sıkıştırma oranı ile lineer olarak düştüğünü buldu. Christensen vd., diesel yakıtının, benzin karışımlarının ve PRF yakıtlarının bir dizisini kullanarak HCCI yanmasına sıkıştırma oranının etkisini araştırdı ve şunları buldu; 10:1' lik bir sıkıştırma oranında yanma verimi %94' tü. 22:1' lik bir sıkıştırma oranında yanma verimi %83' e düştü. Düşük yüklerde HCCI çalışma sahasında verim artışındaki ilerlemelerden daha fazla bir verim kaybı söz konusudur. Değişken sıkıştırma oranı mekanizmalarının zorlukları göze alındığında sıkıştırma oranı için en iyi uzlaşmanın motordan tam-yük performansı elde etmek üzere mümkün olan en yüksek değerin seçilmesi gibi gözükmektedir. En düşük yüklerde daha uygulanabilir olan diğer önlemler, HCCI yanmasında en alt yük sınırını genişletmek üzere aranmak zorundadır.

2.4.4 Yakıt Püskürtme Sistemi

En homojen karışımı elde etmek için taze dolgu ve yakıt arasında uzun bir karışım süresi olması istenir. Bu nedenle erken püskürtmeyi kullanan klasik bir PFI sisteminin, iyi homojen HCCI yanması elde etmek için en avantajlı sistem olacağı belli gibidir. Bir çok araştırmacı tarafından PFI yakıt püskürtmesi kullanılarak başarılı HCCI operasyonu sağlandı (Law vd., 2000; Kontarakis vd., 2000). Fakat bu çalışma modunun sakıncaları vardır. PFI püskürtme, ilave yanma fazı kontrolü için hiçbir potansiyel sunmaz ve maksimum kullanılabilir sıkıştırma oranını sınırlar. Direkt püskürtmeye geçiş sıkıştırma oranı artımı için potansiyel sunar (belirgin biçimde 1.0 ~ 1.5 sıkıştırma oranı artışı) ve böylece HCCI yanma prosesinin en düşük yük sınırında bir genişleme söz konusudur. Direkt püskürtme, aynı zamanda buji arkının artık tesirli (fiili) olmadığı koşullar altında yanma fazı kontrolü için potansiyel sunar. Direkt püskürtme kullanılarak yanma fazının, püskürtme zamanlamasındaki değişiklikler ile kontrol edilebileceği gösterildi (Marriott vd., 2002a). Püskürtme zamanlamasının, emme strokundaki erken püskürtmeden sıkıştırma strokunun sonuna doğru yapılan püskürtmeye değiştirilmesiyle emme havası sıcaklıklarının, motor yüklerinin ve hızlarının bir dizisinde optimum yanma fazını elde edebildiler. CFD hesaplamaları bu yanma fazı değişimlerinin dolgunun kademelendirilmesindeki değişimlere bağlı olduğunu gösterdi. Dolgunun kademelendirilmesindeki değişimler püskürtme zamanlamasındaki değişimlerin sonucudur ve püskürtme zamanlaması emisyonlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Gerçekten Marriott vd. (2002b), değişen püskürtme zamanlamasıyla karışımın homojenlik seviyesine etki edilebildiğini buldular ve böylece motor çıktısı emisyonları değiştirebildiler. Çok homojen bir karışım oluşturmak için erken püskürtme kullanılarak son derece düşük NO_x ve partikül emisyonları elde edilebildi fakat HC emisyonları oldukça yüksekti. Önemli derecede dolgu kademelenmesiyle sonuçlanan geç püskürtme zamanlaması değişikliğiyle HC emisyonlarını azaltabildiler fakat NO_x ve partikül emisyonları kabul edilemez derecede yüksek seyir etti. Bununla birlikte optimum zamanlamayla üç emisyonunda düşük seviyelerini elde edebildiler.

HCCI operasyonunun direkt püskürtmeye muhtaç olmadığı açıkken direkt püskürtme, DI yakıt sisteminin yüksek maliyetini temize çıkaran diğer cazip yararları sağlar. Belirtildiği gibi en düşük yüklerde HCCI operasyonu sağlanamadığında HCCI motoru diğer çalışma modlarına geçmek zorundadır. Eğer motor PFI yakıt püskürtmesi ile çalıştırılırsa motor, en düşük yüklerde gaz kebeğinin kısık konumunda işletilmelidir. Bu durum büyük pompalama kayıplarına ve artan yakıt tüketimine neden olur. Direkt püskürtme işlemi ile motor kademeli

dolgu modunda çalıştırılabilir ki bu durum, yüksek yakıt ekonomisi yararlarının en düşük yüklerde sürdürülmesini sağlar. Bu yaklaşımdaki problem NO_x emisyonlarının artmış olmasıdır ve gelecekteki emisyon mevzuatını karşılamak için düşük NO_x ard işlemini kullanmak gerekebilir.

HCCI yanmanın kontrolü için direkt püskürtmenin belki de en fazla ilgi uyandıran kullanım şekli Willand vd. (1998) tarafından irdelendi. Egzost gazının tekrar sıkıştırılması stratejisinin ve direkt püskürtmenin kullanımı sayesinde bir ön-tutuşma kimyasal aktivasyon prosesi ile HCCI yanmasının kontrolünü sağlayabildiler. Emme prosesinden önce tutulmuş ve sıkıştırılmış olan egzost gazlarına yine emme prosesinden önce direkt olarak yakıtın püskürtülmesiyle kimyasal aktiviteyi başlatabildiler. Bu kimyasal aktivite gerçek sıkıştırma strokunun sonundaki kendi kendine tutuşma prosesi üzerinde hızlandırıcı bir etkiye sahipti. Bundan başka yakıt püskürtme zamanlaması, kimyasal aktivitenin derecesi üzerinde ve dolayısıyla kendi kendine tutuşma prosesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tutulan art gazların sıkıştırılması sırasında yakıt püskürtülmesi, püskürtülen yakıtın sıcaklığını ve konsantrasyonunu yükseltir ve aktivasyon prosesi şiddetlendirilmiştir. Tam emme supabının açılmasından önce genleşme fazı (emme stroku) sırasında yakıt püskürtülmesi püskürtülen yakıtın sıcaklığını ve konsantrasyonunu düşürür ve aktivasyon prosesi daha az yoğundur. Böylece tutulan art gazların tekrar sıkıştırılması prosesindeki yakıt püskürtme olayının stratejik olarak ayarlanması ile kimyasal ön koşullandırmanın değişen derecelerini elde edebildiler. Kimyasal ön koşullandırma eninde sonunda kendi kendine tutuşmanın başlangıcına etkimektedir. Yanma kontrol sahası birer birer anlatılmazken yukarıdaki çalışma, HCCI yanma fazlarının kontrolü için direkt püskürtmenin potansiyelini açıkça göstermektedir. Gerçekten Hiraya vd. (2002b), bu püskürtme stratejisini kullanarak geniş bir operasyon (çalışma) sahasında yanma fazını kontrol etme becerisi gösterdi.

2.4.5 Kendi Kendine Tutuşma Zamanlaması Kontrolü

Bir HCCI motorunda yanma fazını kontrol etmenin esas yolu emme supabının kapanışında basınç ve sıcaklık koşullarını etkilemekten geçer. Sıkıştırma stroku sırasında silindir politropik bir prosesi takip ettiği için sıkıştırma sırasında termodinamik hallerin tümünden bir kez daha görülmektedir ki koşullar emme supabının kapanışında şekillenmektedir. HCCI motorları için geliştirilen kontrol stratejileri, arzu edilen yanma fazını elde etmek için silindir içindeki art gaz seviyelerini değiştirmek üzere kapalı döngü kontrolünün herhangi bir formunu ve supap zamanlaması ayarını kullanmak zorundadır. Emme supabı kapandığında problem söz konusudur. Emme supabı kapandıktan sonra tutuşma için uygun koşullar yerine

getirilememektedir ve tutuşmayı etkilemek için yapılabilecek çok az şey vardır. Tutuşmanın direkt olarak kontrol edilememesi HCCI motorları için ciddi bir problemdir. Tutuşmayı başlatmanın potansiyel bir yolu, ikinci püskürtme olayının kullanılmasıdır (Marriott vd., 2002a). Bununla birlikte erken püskürtmeli HCCI yanmasıyla kıyaslandığında ikinci bir püskürtmenin kullanılması NO_x emisyonlarını önemli derecede arttırmaktadır. Ayrıca geç püskürtme zamanlamasıyla yanma daha kademelidir ve duman emisyonları (is) önemli derecede artar.

Literatürde rapor edilen birbirini tutmayan sonuçlara göre HCCI yanmasına bujinin tesirliliği karışıktır. Ishibashi vd. (1996), iki stroklu bir motorda iki (çift) modlu SI yanmasını gözlemledi. İkili yanma modunda buji bir alevi başlatmak için kullanılmaktadır. Bu alev dolgunun bir kısmını yakar ve karışımın geri kalanını kendi kendine tutuşmaya sevk eder. Bu koşullar altında buji, yanma fazının bir kontrol parametresi olarak kullanılabilir. Aynı zamanda dört stroklu HCCI motorlarda da kendi kendine tutuşmayı başlatmak için buji arkının kullanılması düşünüldü. Ma, gazı iyonize etmek ve sıcak noktalar oluşturmak için sıkıştırma prosesinin başlarında bir çok buji arkının kullanılmasını önerdi. Bu sıcak noktalar neticede kendi kendine tutuşmayı sağlar (Ma, 2001). Bununla birlikte diğer araştırmacıların rapor ettiği durumlarda bujinin, yanma üzerinde hiçbir etkisi yoktu. Tekrar sıkıştırma-supap stratejisini kullanan bir incelemede bujinin yanma üzerinde hiçbir etkisi olmadığı not edildi (Ma vd., 2001). Tekrar sıkıştırma stratejili diğer bir incelemede bujinin yanmayı başlatmak ve yanma fazını etkilemek için kullanılabileceği bulundu (Kontarakis vd., 2000). Hem tekrar sıkıştırma stratejisini hem de tekrar teneffüs etme stratejisini kullanan tek silindirli bir motorda kendi kendine tutuşmayı başlatmak için buji kullanımının potansiyelini değerlendirdiler (Law vd., 2000). Bununla birlikte onlarda buji arkının hiçbir önemli etkisini göremediler. Bu birbirini tutmayan sonuçların hangi mertebede motor-özellik (motora ait) farklılıklardan ileri geldiği ve seyreltik yanma sistemlerinin kimyasal termodinamiğine neyin sebep olduğu bilinmemektedir.

2.4.6 HCCI Emisyonları ve Emisyon Kontrolü

Farklı stratejili seyreltimlerin büyük miktarları ve yanmış gazın düşük pik sıcaklıkları HCCI motorlarda düşük NO_x emisyonlarıyla sonuçlanırken aynı yükte çalıştırılan PFI motorlarıyla kıyaslandığında hem HC hem de CO emisyonları daha yüksektir. Oldukça sade bir anlatımla düşük gaz sıcaklıkları, azalan NO_x emisyonlarından sorumludur ve aynı zamanda HC ve CO' nun artan emisyonlarıyla beraber düşük yanma verimlerinden de sorumludur. Kullanılan

çalışma koşuluna ve seyreltim stratejisine bağlı olarak HC ve CO emisyonları bir PFI motorundakilerden %50' ye kadar ulaşan bir oranda daha yüksek olabilir.

HCCI yanmasına düşük yakıt yüklemesinin etkileri tek bölge bir model kullanılarak hesapsal olarak araştırıldı (Dec, 2002). Model şunu göstermektedir; yük azaldıkça ve kelebeksiz (gaz keleşi tam açık konumda) çalışmayı sürdürmek için art gazın miktarı arttırıldıkça, yanma tamamlanamamaktadır. Her ne kadar tutuşma 900 K ila 1000 K arasındaki sıcaklıklarda elde edilebilse de CO' nun CO₂' ye oksidasyonu için gereken sıcaklık 1300 K' den daha büyüktür. Düşük yüklerde pik sıcaklıklar 1300 K mertebesindedir ve böylece CO oksidasyonu eksik (yarım) kalmaktadır. Bu nedenle düşük yüklerdeki CO emisyonları, ana gazın enerjisinin azlığından (ana gazın söndürücü etkisinden) ileri gelmektedir. Homojen dolgulu PFI motorlarında HC emisyonlarının en büyük kaynağının, yanma odası yarıklarından özellikle piston başından (piston segman paketinden) kaynaklandığı bilinmektedir. HCCI motorları yaklaşık olarak homojen bir dolgu ile çalıştırıldığı için piston başı yarıklarının yine HC emisyonlarına en önemli katkıda bulunan öge olacağı öngörülmektedir. Bir HCCI motorunda piston üst bölge geometrisinin HC emisyonları üzerindeki etkisi araştırıldı (Christensen vd., 2001). Motor, 700 d/dak.' dan 1400 d/dak.' ya uzanan devir aralığında bir dizi emme dolgusu sıcaklıklarında çalıştırıldı. HC emisyonlarının çoğunluğunun piston yarıklarından ileri geldiği sonucuna vardılar. İncelenen çalışma koşulları için bu durum doğruyken Dec' in araştırma sonuçları şunu söyler; yük azaldıkça ve seyreltim seviyesi arttıkça soğuk silindir cidarları aynı zamanda HC emisyonlarını arttırma yönünde katkıda bulunmaktadır.

Her ne kadar HCCI yanmasında yük azaldıkça emisyonlar artmakta ise de motor çıktısı emisyonları, PFI motorlarındakilerden önemli derecede daha kötü değildirlir. Düşük yüklerde HCCI yanmasını etkilemek için iç art gazların yüksek seviyeleri kullanıldığından dolayı emisyonlar, motora tekrar alınır ve bir sonraki çevrimde yanma fırsatına sahiptir. Bununla birlikte seyreltimin yüksek seviyelerinde egzost gaz sıcaklıkları düşük yüklerde önemli derecede azalır ve kolayca 200 °C' nin altına düşebilir. Bu durumda katalizörün görevini yerine getirememesi problemi ortaya çıkmaktadır.

2.5 Gelecek Hedefleri

Bu zamana kadar gerçekleşen ilerlemeye rağmen boşa yakın hızlarda ve yüklerde veya soğuk kısa süreli çalışmada HCCI yanmasının gerçekleştirilebilirliğiyle ilgili problemler, gerçek dünya potansiyelini önemli derecede sınırlamaktadır. Spesifik kararlı durum çalışma koşullarında HCCI yanması büyük yararlar sağlayabilmekteyken boşta ve 60 °C' nin altındaki soğutma

maddesi sıcaklıklarında HCCI yanmanın elde edilememesi benzinli bir HCCI motorunun NEDC yakıt ekonomisini ve NO_x yararlarını sınırlamaktadır (Zhao vd., 2002). Öyle ki gelecekteki benzinli HCCI çalışmalarının, hem soğuk çalışmada ve boş yüklerde ısı enerjisinin sınırlı olduğu durumlarda güçlü HCCI operasyonu için hem de düşük yükteki kısa süreli çalışmalarda yanma fazını kontrol etmek için çözümler bulmaya odaklanması gerekecektir. Düşük yüklerde HCCI yanmasını başlatmaya yardımcı bu çözümler, silindir deaktivasyonunun herhangi bir formunu veya motorun boşta çalıştırılma gereğini önlemek üzere motorun direkt olarak durdurulup/harekete geçirilmesini veya dolgunun kademelendirilmesinin herhangi bir formunu içerir fakat bu çözümlerin işletilebilirliği ve emisyon sonuçları, çözümlerin başarılı olarak uygulanmasını sınırlayabilir (Yamamoto vd., 2002). Tüm çalışma sahasında güçlü yanmanın sağlanması şartıyla alternatif çözümler, kimyasal ön-koşullandırmayı kolaylaştıran direkt püskürtmeyi (Willand vd., 1998) veya darbeli alev jeti gibi yeni bir tutuşma konseptini (Murase vd., 2002) içerebilir. Açıkça söylemek gerekirse umut verici çözümlerin bir dizisi söz konusuysen hala yapılacak çok iş var ve benzinli HCCI yanmanın içten yanmalı motorların yeni bir türünü temsil edip etmeyeceğini sadece zaman gösterecektir.

3. DIESEL YAKITLI HCCI MOTORLAR

3.1 Genel Tanımlama

Diesel motorları son on yıldan daha uzun bir süredir gittikçe katılaştıran emisyon mevzuatı ile karşı karşıyadır. Emisyonlardaki mevcut iyileştirmelere rağmen yeni standartlar, 2007 – 2010’ da yürürlüğe girmek üzere planlandı. Bu yeni standartlar, hem NO_x hem de partikül maddesi (PM) emisyonlarını şimdiki katı 2002 – 2004 standardının ötesinde daha düşük değerlere çekecektir. Bu yeni standartlar gelişimcidir (zorlayıcıdır) ve bu standartlar, motor çıktısı emisyonları azaltmak için gelişmiş yanma sistemlerinin gelişimini, uygun, güvenilir ve fiyat etkili ard işlem sistemlerinin gelişimini ve motor ve ard işlem sistemi operasyonlarının beraber uygulanışındaki iyileştirmeleri kapsayan stratejilerin bir kombinasyonunu muhtemelen gerektirecektir.

HCCI yanma, diesel vari yüksek verimi (verimlilikleri) sürdürmesine karşın hem NO_x hem de partikül (PM) emisyonlarını büyük oranda azaltma potansiyeline sahip olan cazip bir gelişmiş yanma prosesidir. Klasik diesel yanmasından (operasyonundan) farklı olarak HCCI yanma bir alev cephesinin ilerleyişini kullanmaz. Daha doğrusu yanma, dolgu gaz (karışım) hacminin her tarafındaki birçok noktada içten gelen kendi kendine tutuşmanın sonucu olarak meydana gelir. HCCI’ nin bu eşsiz özelliği çok fakir veya seyreltik karışımların yanmasına imkan verir ki düşük yanma sıcaklıklarının sonucu olarak motor çıktısı NO_x emisyonları azalır. Aynı zamanda klasik diesel yanmasından farklı olarak (PM) emisyonları çok düşük olabilmektedir çünkü dolgu iyice karışmıştır.

HCCI’ nin ilk uygulamaları benzin yakıtlı motorlarda gerçekleştirildi ve günümüzde bu teknolojinin takibi sıkı bir şekilde sürdürülmektedir. Bununla birlikte diesel motorların emisyonlarının azaltılmasının gerekliliği, 1990’ lı yılların ortasından itibaren diesel yakıtlı HCCI’ nin potansiyelinin araştırılmasına hız verirdi. Diesel yakıtlı HCCI operasyonunun tercih edilmesi için birçok sebep vardır. Diesel yakıtlı HCCI operasyonu özellikle orta ve ağır ölçekli kamyon motoru pazarı için tercih edilmelidir. Şu da bir gerçektir ki taşıt motorlarında HCCI’ nin kullanımı yanma sistemi çift modlu motorlarla sınırlıdır. HCCI’ nin bu kullanım şekli yakın gelecek için geçerlidir (Stanglmaier vd., 1999; Epping vd., 2002). Soğukta motoru harekete geçirmedeki ve ağır yüklerde HCCI motorlarının (operasyonlarının) yanma hızlarının kontrol edilmesindeki zorluklardan ötürü (bu koşullar motorun çalışma sahasının 1/3’ ü ila 1/2’ lik kısmını kapsar) bu koşullarda, klasik diesel veya buji ateşlemesi (SI) operasyonu kullanılır. Çalışma sahasının geri kalanında HCCI’ nin avantajlarından faydalanılır. HCCI operasyonu için tahmin edilen yük limitinin üzerindeki yüklerde çalışma,

kamyon motorlarının pek çoğu için sürüş çevriminin önemli bir kısmını teşkil ettiği için motor HCCI modunda değilken motorun bir diesel motor gibi çalıştırılmasının önemli verim avantajları vardır. Ayrıca diesel motorları SI motorlarına göre geçmişten bugüne değin güvenilirlik ve işletme masrafları avantajlarına sahiptir. Neticede tüm ağır yük kamyonları genellikle diesel yakıtı kullandığı için gerekli tesisler bakımından diesel yakıtı tercih edilir. HCCI motorları kullanıldığında rafineri üretimlerini daha uçucu yakıtlara dönüştürmek ve yakıt dolum istasyonlarında iki yakıt çeşidini bulundurmamak çok pahalı olacaktır. Bu sebeplerden ötürü iki yakıt çeşidi kamyon gövdesinde taşınmadıkça HCCI operasyonu, bu kamyon motorlarında diesel yakıtı ile başarılmak zorundadır.

Diesel motorlarda düşük yükler için HCCI' nin kullanımı, aynı zamanda potansiyel (muhtemel) diesel motor ard işlem sistemleriyle elde edilen benzer emisyon sonuçlarını verir. Diesel ard işlem teknolojilerinin birçoğu (örneğin NO_x adsorpsiyon katalizörleri), egzost gazı sıcaklığının düşük yüklerde normal diesel operasyonu tarafından üretilen egzost gazı sıcaklıklarından yüksek olmasını gerektirir. HCCI' nin kullanımı, ard işlem proseslerinin uygulanmasının daha zor olduğu düşük yük koşullarında NO_x ve PM emisyonları için ard işlem ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Bununla birlikte düşük yükteki HCCI operasyonu, düşük sıcaklıklarda hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) emisyonlarını kontrol etmesi için oksidasyon katalizörlerine muhtemelen gereksinim duyacaktır.

Yukarıda özetlenen sebeplerden ötürü her ne kadar diesel yakıtlı HCCI operasyonu tercih edilse de iki ana sebepten ötürü diesel yakıtı ile uygun HCCI yanmanın elde edilmesi zordur. Birinci sebep şudur. Önemli derecede buharlaşma meydana gelmesi için yükseltilmiş dolgu sıcaklıklarına gerek vardır ki bu yüksek sıcaklıklar, bir ön karışımli homojen dolgu modelinin oluşturulmasını zorlaştırır. İkinci sebep ise diesel yakıtın soğuk-yanma kimyasına sahip olmasıdır. Bu soğuk yanma kimyası, sıkıştırma sırasındaki sıcaklıklar 800 K' ni aştığında çabucak kendi kendine tutuşmayı sağlar (Kelly-Zion ve Dec, 2000). Yukarıdaki olaylar aşırı derecede gelişmiş (erken tutuşma zamanlamalı) yanma fazıyla sonuçlanabilir. Bu nedenle sıkıştırma oranlarının azaltılması ve düşük emme havası sıcaklıkları gerekir. Bununla birlikte HCCI' nin birçok potansiyel avantajından ötürü diesel yakıtlı HCCI' nin anlaşılması ve HCCI' nin ticari uygulamaları için bazı yaklaşımların geliştirilmesi adına büyük çabalar sarf edilmektedir.

Diesel yakıtlı HCCI' nin gelişimi ve araştırmaları yakıt tedariki tekniklerine göre üç ana katagoride incelenebilir. 1) Ön karışımli HCCI operasyonunda yakıt, emme prosesinden önce havanın içine dağıtılır; 2) Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda yakıt, kendi kendine

tutuşma olayından önce karışımın oluşabileceği şekilde ÜÖN' nin yeterince uzağında silindir içerisine püskürtülür; 3) Geç direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda yakıt, klasik diesel yanmasındakinden (operasyonundakinden) daha geç püskürtülür. Bu operasyon, hızlı karışım oluşumu için yüksek türbülans seviyeleriyle ve tutuşmayı geciktirmek için egzost gazının tekrar sirkülasyonunun (EGR) yüksek seviyeleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamalar kendi kendine tutuşma olayından önce yakıt ve havanın yeterince karışmış olmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca çeşitli yakıt püskürtme stratejileri için tutuşma zamanlamasını kontrol etmenin ve ısının açığa çıkış hızını yavaşlatmanın bir çaresi olarak son zamanlarda su püskürtmenin kullanımı incelenmektedir. Müteakip dört ana kısım, diesel ve diesel benzeri yakıtları kullanan HCCI operasyonları için yukarıdaki üç tip yakıt tedariki tekniğini ve su püskürtmesini kapsayan literatürü gözden geçirmektedir.

3.2 Ön Karışım HCCI Operasyonu

Manifolda yakıtın püskürtüldüğü klasik bir SI motoruna benzer bir şekilde emme supabının yukarı kısmında emme havasının içine yakıt püskürtülmesi bir ön karışım dolgunun elde edilmesi için belki de en basit yaklaşımdır. Bu yaklaşım, geçmişte diesel isini azaltmak için (Alperstein vd., 1958)' de, diesel yakıtlı HCCI operasyonuna ait yakın tarihteki araştırmalarda (Ryan III ve Callahan, 1996; Gray ve Ryan III, 1997), ön karışım diesel yakıtlı HCCI operasyonunun diğer incelemeler ile birlikte ele alındığı daha yeni çalışmalarda kullanıldı.

Ryan III ve Callahan (1996), kendilerinin öncü çalışmasında emme havası akımına diesel yakıtını tedarik etmek üzere bir PFI yakıt enjektörü kullandılar. Yakıt püskürtme noktasının yukarı kısmında bir emme havası ısıtıcısının kullanımı ön ısıtmayı gerçekleştirdi ve motorun sıkıştırma oranı 7.5:1 ile 17:1 arasında değiştirildi. Aynı zamanda EGR' de uygulandı. Yukarıdaki inceleme ve aynı motorda devam ettirilen incelemeler (Gray ve Ryan III, 1997), diesel yakıtlı HCCI operasyonu için üç önemli sonucu belirledi. Birinci sonuç şudur. Normal diesel sıkıştırma oranları kullanıldığında çok erken tutuşma ve neticesinde vuruntu meydana gelmektedir. Memnun edici sonuçlar EGR' nin miktarına ve emme havası sıcaklıklarına da bağlı kalarak sıkıştırma oranının 8:1 ile 13:1 arasındaki değerlerinde elde edildi. 9:1 ile 11:1 arasındaki sıkıştırma oranları, yakıt tedariki derecelerinin (fakir yada zengin karışım) en geniş aralığında uygun bir yanma sağladı fakat yanma fazı, bu düşük sıkıştırma oranlarıyla bile hala gelişikti. Elde edilen ikinci sonuç şudur. Sıvı yakıtın emme sistemindeki yüzeylerde birikimini azaltmak için 135 °C ile 205 °C arasında değişen epeyce yüksek emme havası sıcaklıkları gereklidir. Aynı zamanda emme havası sıcaklıkları 130 °C' nin altına düştüğünde duman emisyonları (is) önemli derecede arttı. Araştırmacılar bu durumun yanmanın iri

damlacıkların çevresinde dağınık difüzyon alevleri şeklinde gerçekleşmesinden ötürü meydana geldiğini öne sürdüler. Elde edilen üçüncü sonuç şudur. Yanmamış HC emisyonları oldukça yüksektir. Düşük yanma veriminin, azaltılmış sıkıştırma oranlarının ve optimal olmayan yanma fazının bir sonucu olarak normal direkt püskürtmeli diesel yanmasına (operasyonuna) göre yaklaşık %28' lik bir ortalama yakıt sarfiyatı arttı. Bununla birlikte HCCI operasyonunda NO_x emisyonları, bir spesifik güç temelinde klasik diesel yanmasındakilerden (operasyonundakilerden) yaklaşık olarak 100' lük bir faktörün etkinliğiyle daha düşük seviyelere indi. Yukarıda not edilen optimal aralıktaki emme havası sıcaklıklarıyla bütün HCCI noktaları için duman seviyeleri aynı zamanda 0' a yakın azaldı.

Gray ve Ryan III (1997), aynı zamanda yanma odası yüzeylerinde seramik kaplama kullanımını araştırdı. Her ne kadar tüm değişimler çok miktarda olmasa da seramik kaplama uygulaması ile şunları not ettiler; düşük emme havası sıcaklıklarında yakıt tedarigi derecelerinin daha geniş bir aralığında memnun edici HCCI operasyonu sağlanabilmektedir ve aynı zamanda yanma veriminde küçük bir iyileşme söz konusudur.

Diğer araştırmacıların müteakip incelemelerinde HCCI operasyonu için ön karışimli yakıt tedarigi tekniği uygulandı ise de bu incelemeler, daha kapsamlı araştırmaların bir parçası olarak yürütüldü. Christensen vd. (1999a), değişik yakıt tipleriyle HCCI operasyonunun kontrol edilmesi (sağlanması) için değişken sıkıştırma oranı araştırmalarının bir parçası olarak PFI yakıt tedarigi yöntemiyle diesel yakıtlı HCCI operasyonunu araştırdılar. Elde edilen sonuçlar, [Ryan III ve Callahan, (1996); Gray ve Ryan III, (1997)]' nin kilerle genel olarak uyuşmaktadır. Memnun edici HCCI operasyonunun 10:1 ila 11.2:1 arasındaki sıkıştırma oranlarında ve bu sıkıştırma oranlarına sırasıyla tekabül eden 130 °C ila 90 °C arasındaki emme havası sıcaklıklarında elde edildiğini buldular. Bununla birlikte tutuşma zamanlamasının (tutuşma gecikmesinin) üst ölü noktadan önce yaklaşık 5° krank açısı kadar bir avansla gerçekleşmesinin “iyileşmiş yanma kalitesi ve kararlı operasyon” elde etmek için gerekli olduğunu belirttiler. Duman emisyonları bazı koşullarda yüksekti ve her ne kadar NO_x emisyonları çok düşük ise de (0.03 g/kWh) benzinli çalıştırılmadaki kadar düşük değildi. Bu sonuçların diesel yakıtının az buharlaşmasının homojen olmayan bir karışım oluşturmasından ötürü meydana geldiği düşünüldü.

Diğer bir grup, ön karışimli diesel yakıtlı HCCI operasyonunu normal (DI) diesel püskürtmesi ile birleştirerek araştırdı (Suzuki vd., 1998; Odaka vd., 1999). Alperstein vd.' nin 1958' deki is incelemesi çalışmalarındakinden farklı olmayan bir teknik kullanıldı. Bu çalışmada bir benzin tipi direkt püskürtme enjektörü (GDI) 5 MPa püskürtme basıncıyla emme manifoldu

içerisine diesel yakıtını tedarik etmek için kullanıldı. Diğer araştırmalarda da görüldüğü üzere diesel-vari sıkıştırma oranı kullanıldığında dolgunun ön karışımli kısmının yanma fazı ciddi şekilde aşırı geliştiktir öyle ki ağır yüklerde vuruntu problemi ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda ön karışımli diesel yakıt tedarigi tekniğinde HC emisyonları çok yüksektir ve düşük yanma verimi ve zamansız (yersiz) yanma fazından ötürü yakıt sarfiyatı artar. Bu çalışmanın ana hedeflerinden biri, (DI) diesel püskürtmesiyle ateşlenen ön karışımli dolgunun yanma (tutuşma) zamanlaması kontrolünün elde edilmesidir. Bu olay izooktanın ön karışımli yakıt olarak kullanıldığı bazı koşullarda sağlandı (Suzuki vd., 1997b; Ishii vd., 1997). Bununla birlikte diesel yakıtı kullanıldığında ön karışımli yakıtın kendi kendine tutuşması daima direkt püskürtülen yakıtın kendi kendine tutuşmasından önce meydana gelmektedir. Direkt püskürtme üst ölü noktadan 15° krank açısı önce gerçekleştirildi (Suzuki vd., 1998; Odaka vd., 1999). Diesel yakıtına MTBE' nin ilave edilmesi ön karışımli yakıtın kendi kendine tutuşmasını geciktirdi. %50' lik MTBE ve %50' lik diesel yakıt karışımının kullanılmasıyla ön karışımli yakıtın kendi kendine tutuşmasındaki gecikme, ÜÖN civarlarında gerçekleştirilen direkt püskürtme tarafından yanmanın kontrol edilmesi için yeterlidir. Böylece arzu edilen yanma zamanlaması kontrolü, diesel yakıtından farklı diğer yakıtlarla da başarıldı.

Ön karışımli diesel yakıtlı HCCI operasyonu aynı zamanda emme manifoldu üzerine yerleştirilen 12 MPa püskürtme basınçlı bir kapalı tip enjektör kullanılarak gerçekleştirildi. HCCI operasyonunun çalışma sahasının genişletilmesi için su püskürtmesi kullanımı araştırmalarının bir parçası olarak ön karışımli diesel yakıtlı HCCI operasyonu sağlandı (Kaneko vd., 2002). Bu incelemede emme havası sıcaklığı 20 °C' de tutuldu ve hiçbir ısı buharlaşmaya yardım etmesi için tedarik edilmedi. Diesel yakıtı kullanıldığında tahminen (muhtemelen) diesel yakıtının silindir duvarına yapışmasından ötürü HC emisyonları arttı ve yağlama yağı incelendi. Diesel yakıtı kullanıldığında aynı zamanda epeyce NO_x ve kayda değer duman emisyonları söz konusudur ki bu durum, karışımın yeterince homojen olmadığına işaret etmektedir. Diesel yakıtı distilasyon karakteristikleri benzininkine benzer olan hafif nafta ile değiştirildiğinde yukarıdaki problemler yok edildi.

Bununla birlikte Kaneko vd.' nin (2002) araştırmaları, diesel yakıtının tek kayda değer avantajını gösterdi. Naftanın 27' lik setan sayısı ile kıyaslandığında diesel yakıtı 48' lik bir setan sayısına sahip olmasına rağmen vuruntu sınırına ulaşılması öncesinde diesel yakıtı önemli derecede daha yüksek yakıt tedarigi derecelerinde (daha zengin karışımli) HCCI operasyonuna olanak sağladı. Vuruntuyla sınırlı IMEP, diesel yakıtı ve nafta için sırasıyla yaklaşık 5 bar ve 3.8 bar idi. Bu farklılık diesel yakıtlı dolgu karışımının yeterince homojen olmayışına dayandırıldı. Diesel gibi yakıtlar, iki safhalı tutuşma prosesiyle sonuçlanan soğuk

yanma kimyasına sahiptir. Soğuk yanma safhası (1.safhadır) vasıtasıyla açığa çıkan ısının miktarı yakıt/hava denklik oranına (ϕ) dayandığı için ana tutuşmanın başlangıcı (2.safhadır) denklik oranı değiştikçe farklı hızlarda gerçekleşir. Yüksek denklik oranlı karışımlarda ana tutuşmanın başlangıcı daha hızlı olmaktadır (Kelly-Zion ve Dec, 2000). Bu nedenle homojen olmayan diesel yakıtı/hava dolgununun farklı denklik oranlı bölgelerinin farklı hızlarda kendi kendine tutuşacağı tahmin edilmektedir. Bu durum daha düşük bir toplam ısı açığa çıkış hızına neden olur ki böylece vuruntu için daha düşük bir doğal eğilim söz konusudur. İzooktan gibi tek-safhada tutuşan yakıtlar için tutuşma zamanlamasının denklik oranı üzerine bu şekilde bir bağımlılığı gözlenmedi (Kelly-Zion ve Dec, 2000).

Ön karışimli yakıt tedariki tekniğini kullanan yukarıdaki araştırmaların sonuçları, esas itibariyle diesel yakıtlı motorların NO_x ve duman emisyonlarının azaltılması için HCCI operasyonunun yüksek potansiyelini göstermektedir. Bununla birlikte araştırma sonuçları aynı zamanda şunu da belirtmektedir. Seri üretim diesel yakıtlı motorlarda uygulanabilir (pratik) bir teknikle ön karışimli HCCI operasyonu gelişecek gibi değildir. Ön karışimli HCCI operasyonunda diesel yakıtı kullanımıyla ilgili zorlukları aşmak için alternatif yakıt tevzi ve karışım oluşturma teknikleri muhtemelen gerekecektir.

3.3 Erken Direkt Püskürtmeli HCCI Operasyonu

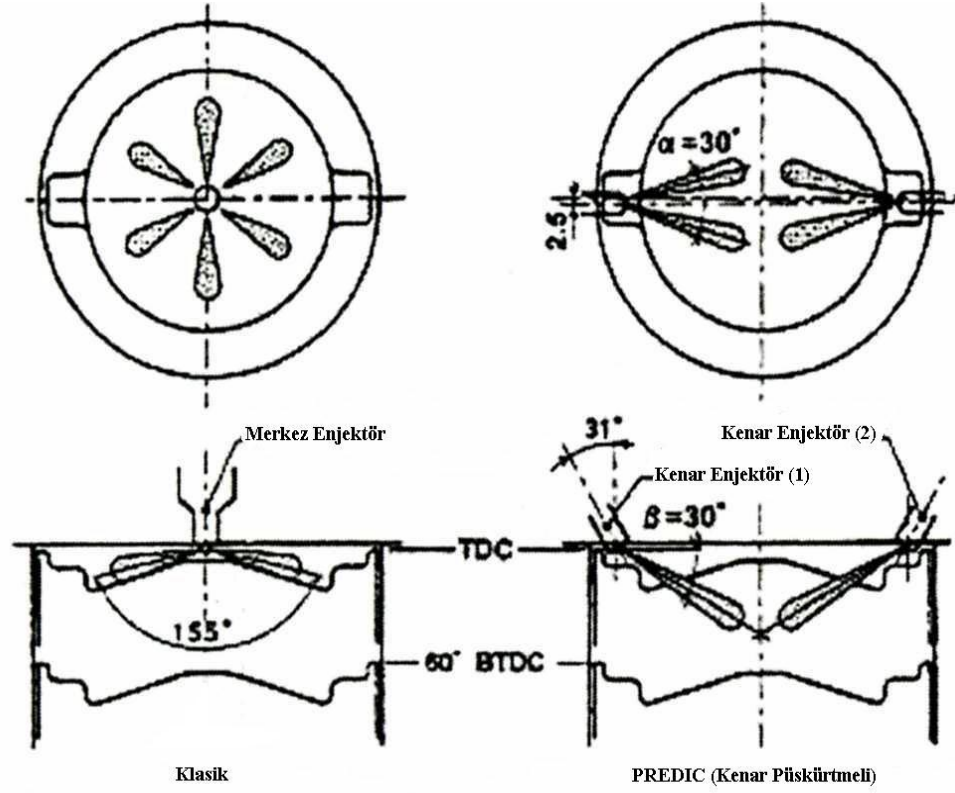
Üst ölü noktadan çok önce direkt yakıt püskürtme prosesi, diesel yakıtlı HCCI operasyonu için belki de yaygın olarak araştırılan yaklaşımdır. Emme prosesindeki (manifoldundaki) ön karışım oluşumuyla kıyaslandığında bu yaklaşım, üç potansiyel avantaj sağlamaktadır. 1) Sıkıştırma strokunun belli bir aşamasından sonra yakıtın püskürtülmesiyle silindir içerisindeki daha yüksek sıcaklıklar ve yoğunluklar, diesel yakıtının buharlaşmasına ve karışım oluşumunun gelişimine yardım edebilir. Bu durum daha soğuk emme havası sıcaklıklarının kullanılmasına olanak verir ki böylece dolgunun erken tutuşma doğal eğilimi azaltılır. 2) Özenle dizayn edilmiş bir enjektörün kullanılmasıyla yakıtın silindir duvarını ıslatmasını minimize etmenin olasılığı vardır. Yakıtın silindir duvarını ıslatması, yanma yetersizliğine ve yağın seyrelmesine neden olabilir (Akagawa vd., 1999; Kaneko vd., 2002). 3) Prensipinde hem HCCI hem de klasik diesel operasyonu için sadece tek yakıt tedariki sistemi gereklidir. Bununla birlikte literatürde rapor edilen HCCI DI-yakıt tedariki sistemlerinin tümü, klasik diesel yanması (operasyonu) ile bağdaşmaz. HCCI operasyonu için erken direkt püskürtmenin ana dezavantajı, yakıt/hava karışımının oluşması için daha az sürenin mevcut olmasıdır. Eğer karışım yeterince tam (homojen) değilse NO_x ve PM emisyonları yüksek olabilir. Ayrıca yakıtın aşırı nüfuziyetinden ötürü silindir duvarının kolayca ıslanması söz

konusudur. Neticede püskürtme zamanlaması, klasik diesel yanmasındaki (operasyonundaki) kadar yanma fazının direkt olarak kontrol edilmesinde tesirli bir çare olmadığı için erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda yanma fazı kontrolünün hala kritik bir konu olduğu unutulmamalıdır.

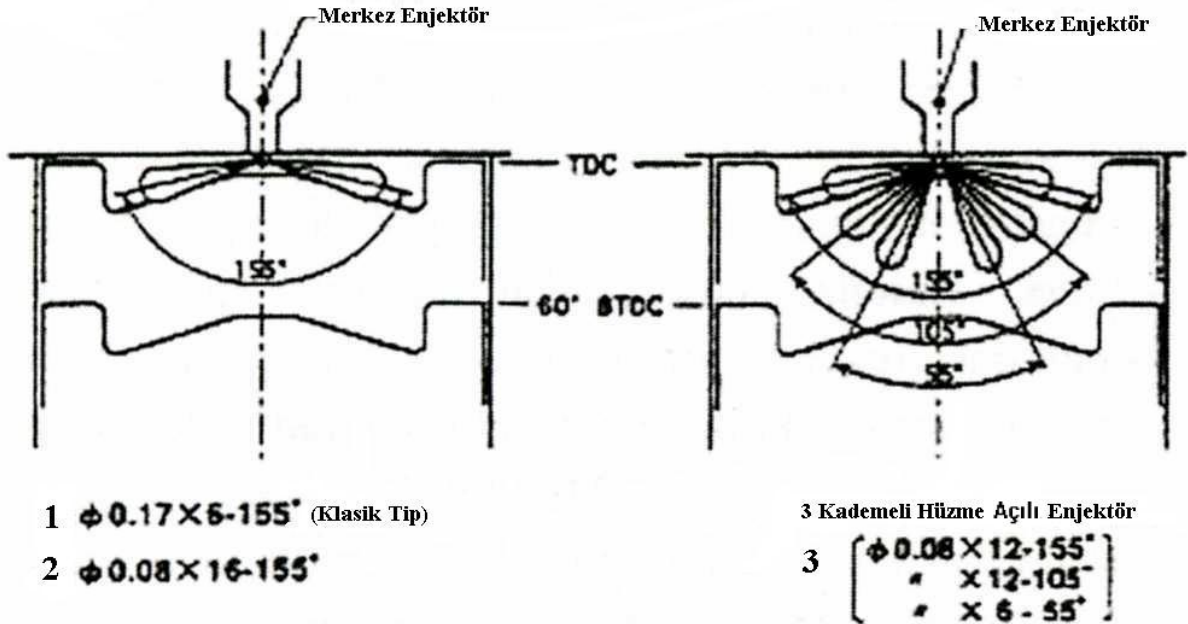
Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunu klasik diesel püskürtmesi ile birleştiren iki safhalı püskürtme tekniklerinin kullanıldığı erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonun, birçok farklı metodu araştırıldı. Bu teknikler aşağıdaki başlıklar altında tartışılmaktadır ki bu başlıklar, uluslararası literatürde tekniklerin yayınlanmış kronolojisine göre ismen sunulmaktadır.

3.3.1 New ACE Institute, Japonya

Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunun en önemli uygulamalarından biri, Japonya da ki New ACE Enstitüsünde yürütülen çalışmadır. Takeda vd. 1996 ve Nakagome vd. 1997 tarafından yürütülen bu çalışmanın ilk raporları, değişik yakıt püskürtme stratejilerini tartışır ve bu teknikle, çok düşük NO_x ve duman emisyonlarının sağlanmasının mümkün olduğu gösterildi. Bununla birlikte ön karışimli diesel yakıtlı HCCI operasyonuna benzer şekilde düşük yanma verimi ve aşırı derecede gelişmiş yanma fazından ötürü klasik diesel çalışmasına göre HC emisyonları yüksektir ve yakıt sarfiyatı önemli derecede artar. Bu araştırmalarda rapor edilen maksimum yakıt tedariki derecesi $\phi = 0.4$ ($\lambda = 2.5$) tür ki en iyi sonuç için (emisyon yönünden) üst ölü noktadan önce 120° krank açısı gibi çok erken bir püskürtme zamanlamasını gerektirmektedir. Klasik diesel enjektörlerinin dizayn edilmiş olduğu ÜÖN koşullarına kıyasla silindir içi hava yoğunlukları ve sıcaklıkları daha düşükken yakıt üst ölü noktadan çok önce püskürtüldüğünde meydana gelme olasılığı bulunan aşırı nüfuziyet ve silindir duvarının ıslanması problemini azaltmak ve yakıtı daha iyi dağıtmak için üç alternatif püskürtme tekniği denendi. Bu alternatif teknikler; 1) meme deliği ölçüsünün 0.17 mm' den 0.08 mm' ye küçültülmesini ve meme deliği sayısının 6' dan 16' ya çoğaltılmasını 2) değişik açılarda yerleştirilmiş otuz adet 0.08 mm çapında meme deliği bulunan bir enjektör ucunun kullanılmasını 3) silindirin her iki kenarına yerleştirilen iki karşı konumlu enjektörün kullanılmasını kapsar ve böylece enjektörlerin her biri birbirlerine yönlendirilmiş iki yakıt hüzmeleri oluşturmaktadır ki bu yakıt hüzmeleri, yanma odasının ortasında çarpışır.



Şekil 3.1 Klasik diesel operasyonunda ve kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunda yakıt hüzmesinin lokasyonu (durumu)

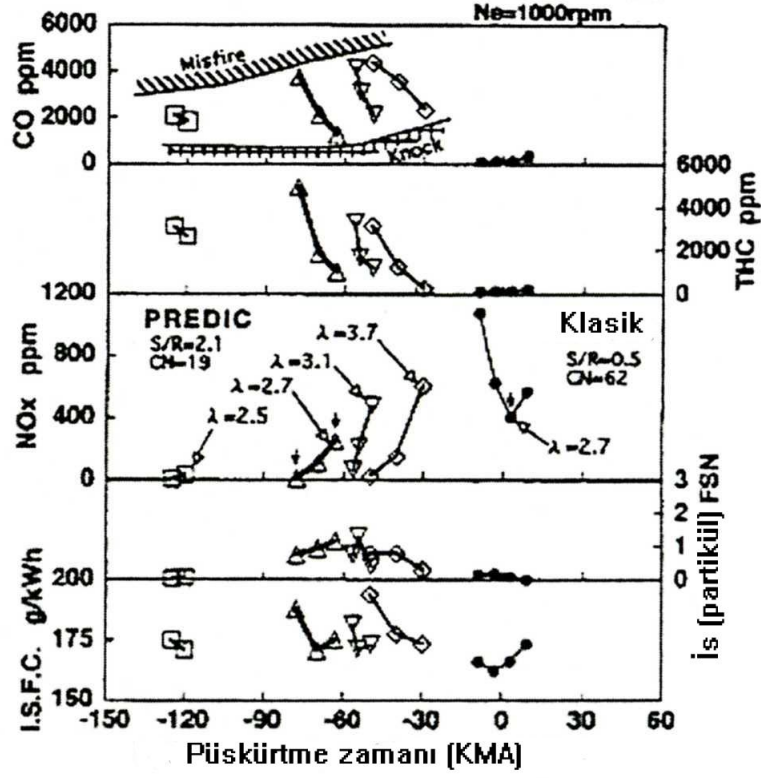


Şekil 3.2 Merkez püskürtmeli PREDIC operasyonunda yakıt hüzmesinin lokasyonu (durumu)

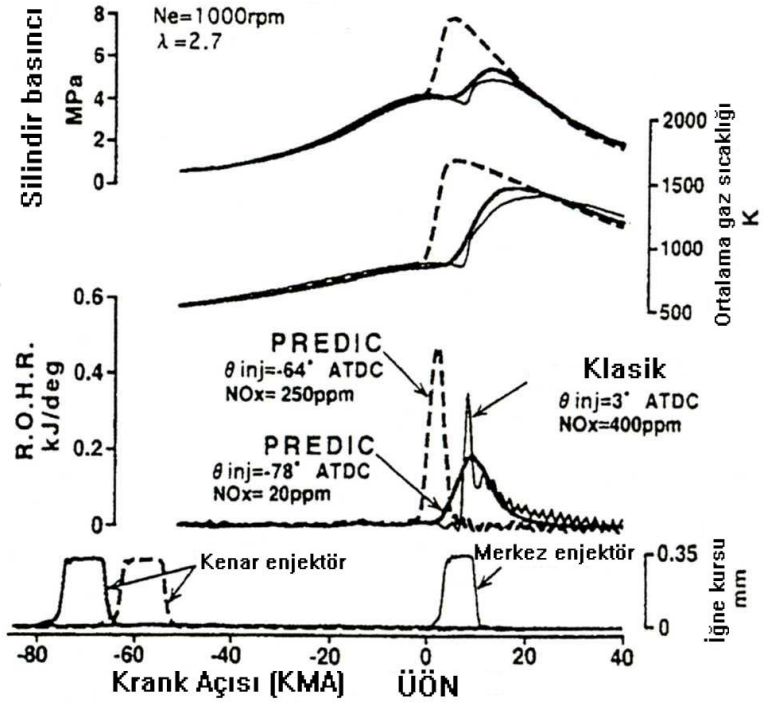
Çizelge 3.1 Motor özellikleri ve test koşulları

| | Klasik Diesel Püskürtmesi | PREDIC Operasyonunda (Kenar Püskürtme) | PREDIC Operasyonunda (Merkez Püskürtme) |
|-------------------------|---------------------------------------|---|--|
| Çap X Strok | 135 mm X 140 mm | 135 mm X 140 mm | 135 mm X 140 mm |
| Motor Hacmi | 2004 cm ³ | 2004 cm ³ | 2004 cm ³ |
| Silindir Kafası | 2 Emme 2 Egzost Supabı | 2 Emme 2 Egzost Supabı | 2 Emme 2 Egzost Supabı |
| Yanma Odası | Ø 98 mm Sığ Tabak (Tabanı Bombeli) | Ø 98 mm Sığ Tabak (Tabanı Bombeli) | Ø 98 mm Sığ Tabak (Tabanı Bombesiz) |
| Sıkıştırma Oranı | $\epsilon = 16.5$ | $\epsilon = 16.5$ | $\epsilon = 16.5$ |
| Türbülans Oranı | T / O = 0.5 | T / O = 2.1 , 0.5 | T / O = 0.5 |
| Enjektör Konumu | Merkez | Kenar 1 , Kenar 2 | Merkez |
| Püskürtme Özellikleri | Ø 0.17 X 6-155 ° | Ø 0.17 X 2 , $\alpha = 30^\circ$ $\beta = 30^\circ$ | Parametreler Şkl 3.2' de |
| Püskürtme Basıncı | 100 Mpa | 100 Mpa , Maks. 150 Mpa | 150 Mpa , Maks. 250 Mpa |
| Diesel Yakıtı (motorin) | Setan Sayısı = 62 | Setan Sayısı = 19, 40, 62 | Setan Sayısı = 40 |

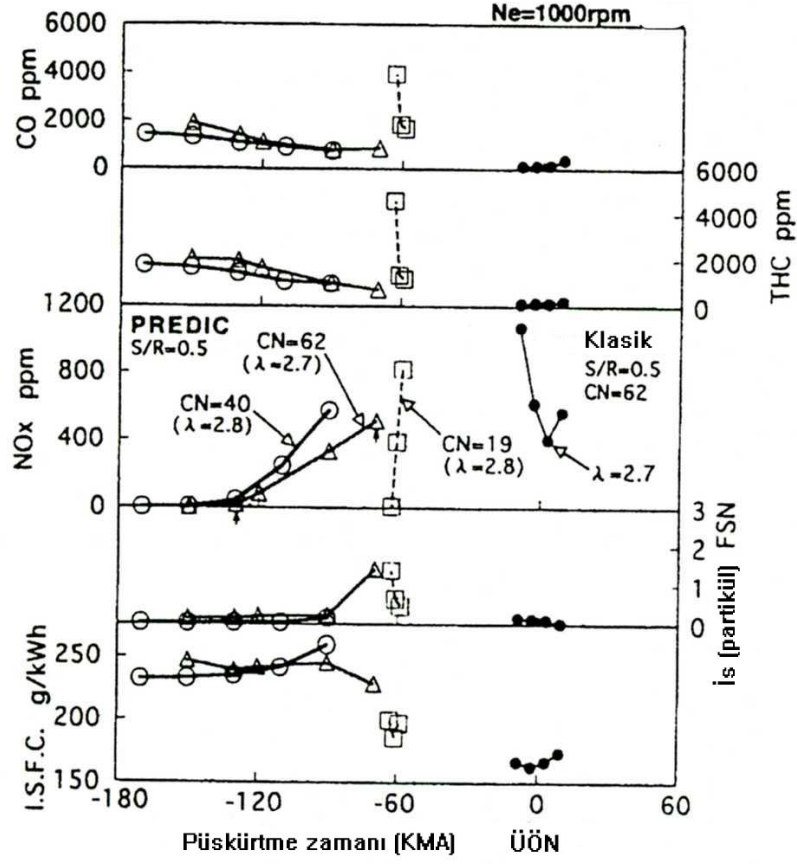
Setan sayısı 62 olan temel diesel yakıtının 16.5:1' lik temel sıkıştırma oranıyla beraber kullanımını önemli derecede aşırı gelişmiş yanmayla sonuçlandı. Aşırı gelişmiş yanma probleminin üstesinden gelmek için setan sayısı 19 ve 40 olan özel yakıt karışımları geliştirildi ve bu özel yakıt karışımları, emme havası sıcaklığı ve sıkıştırma oranı değişiklikleri ile beraber test edildi.



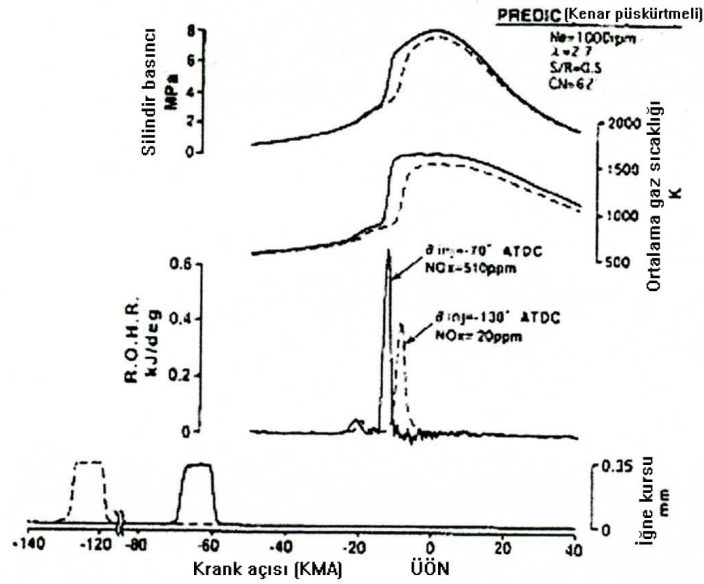
Şekil 3.3 Kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunda motor performansı ve emisyonları



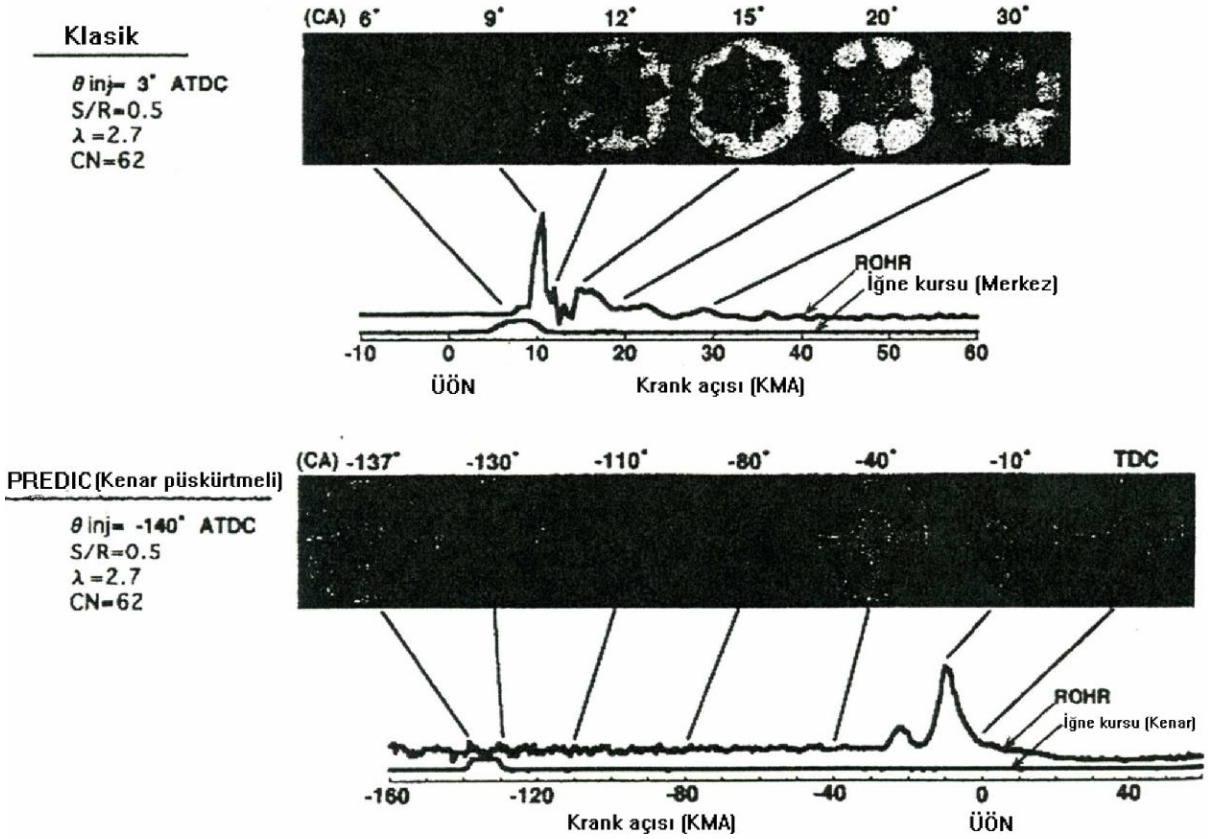
Şekil 3.4 Kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunda ısı açığa çıkış hızı



Şekil 3.5 Motor performansı ve emisyon kıyaslaması (Kenar püskürtmeli PREDIC için)



Şekil 3.6 Isı açığa çıkış hızının kıyaslanması (Kenar püskürtmeli PREDIC için)



Şekil 3.7 Klasik diesel operasyonunun ve kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunun yanma fotoğrafları ($N_e = 1000$ rpm)

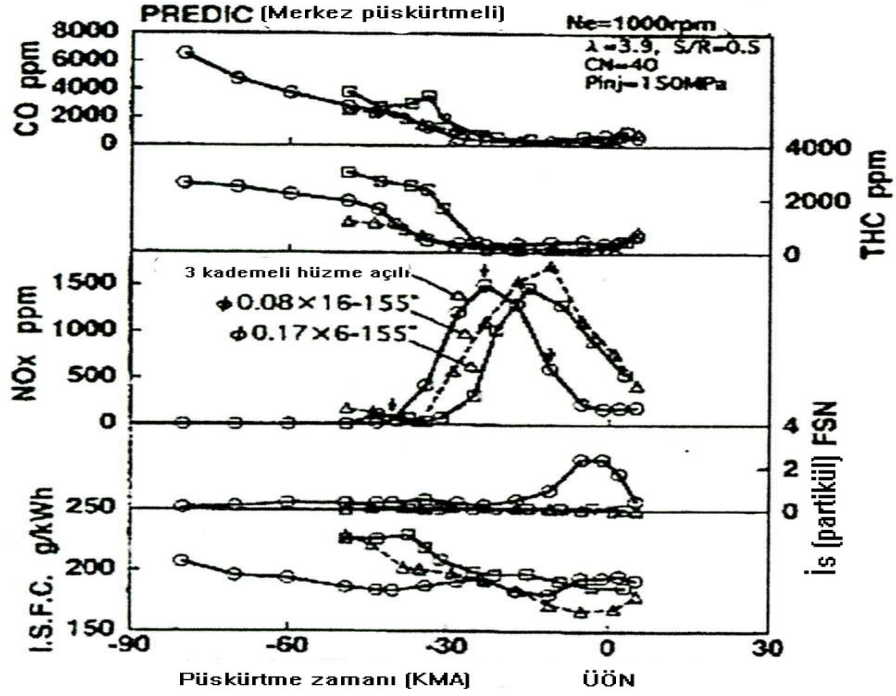
Yanma gözlemi, iki ayrı yakıt püskürtme tekniği için gerçekleştirildi. Bunlardan biri klasik diesel püskürtmesi, diğeri ise kenar püskürtmeli PREDIC operasyonu içindir. Motorun özellikleri korunarak motor, alt görüş tipinde bir vizüel (görsel) motora dönüştürüldü ve resimler, lazer gölgegrafi (shadowgraphy) metodu kullanılarak çekildi. Her iki durumda da türbülans oranı 0.5 ve yakıt setan sayısı 62' dir. Şekil 3.7, gözlem sonuçlarını ve aynı zamanda ısının açığa çıkış hızını göstermektedir. Yanma odasının şekli (piston yapısı), düz tabak tipindedir ve buradaki oyuk, gözlem alanı olarak iş görmektedir.

Klasik diesel operasyonunda yakıt püskürtme prosesi, merkez enjektör kullanılarak ÜÖN' dan 3° krank açısı sonra başlatılmaktadır. Kısa bir tutuşma gecikmesi periyodunun ardından yanma, parlak alevlerin varlığında gerçekleşmektedir. Şekil 3.5' in sonuçlarından bu koşuldaki NO_x konsantrasyonun yaklaşık 400 ppm olduğu görülebilir.

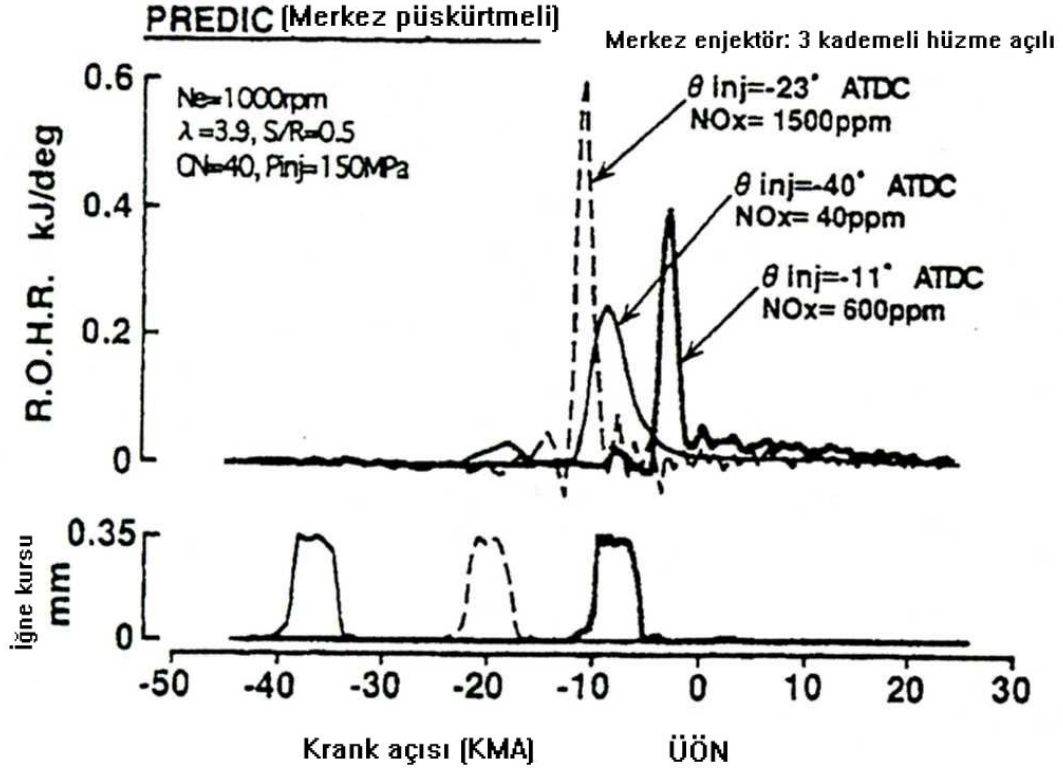
Kenar püskürtmeli PREDIC operasyonuna bakıldığında püskürtme prosesi, ÜÖN' dan 140° krank açısı önce başlatılmaktadır ve yakıt hüzmeleri, silindir merkezi civarlarında birbirleriyle çarpışmaktadır ve böylece yakıt hüzmeleri gözlem alanına iyice yayılır. Bu evreden sonra yakıtın daha çok buharlaşmasını sağlayacak şekilde basınç artışıyla beraber

silindir içi sıcaklıklar yükselir. ÜÖN' dan yaklaşık 40° krank açısı önce yakıt hüzmeleri, ayırt edilemez (homojen) durumdadır. ÜÖN' dan yaklaşık 25° krank açısı önce bir yumru (pik) hasıl olmaktadır ki bu durum, muhtemelen soğuk alev safhasına karşılık gelmektedir. Bu evreden sonra ana yanma gerçekleşmektedir.

Şekil 3.7' de görüldüğü üzere ana yanma esnasında parlak alev gözlenmemektedir. Bu durumun yerine "dalgalanma" olarak tabir edilebilen bir görüntü şekli (formu) söz konusudur. Bu dalgalanmanın da ana yanma periyodu zarfındaki yoğunluk farklılıklarından ileri geldiği düşünülmektedir. Bu dalgalanmayı sabit fotoğraflara bakarak fark etmek zordur fakat videodaki gibi hareketli resimlere bakarak dalgalanmayı gözlemek mümkündür. Şekil 3.5' in sonuçlarından bu koşuldaki NO_x konsantrasyonunun yaklaşık 20 ppm olduğu görülebilir.



Şekil 3.8 Merkez püskürtmeli PREDIC operasyonunun motor performansı ve emisyonları



Şekil 3.9 Merkez püskürtmeli PREDIC operasyonunun ısı açığa çıkış hızı

Aynı zamanda çeşitli seyreltikleştirici gazlar incelendi ve CO_2 gazının daha yüksek özgül ısısından ötürü yanma fazının kontrol edilmesi için yararlı bir etkiye sahip olduğu keşfedildi. Yukarıdaki parametrelerin çeşitli kombinasyonlarıyla yanma fazı, ÜÖN yakınlığında elde edilir ki bu durum, yakıt sarfiyatının azalmasıyla sonuçlanır. Müteakip bir araştırmada bir türbülanslı akış kapalı tip enjektörünün gelişimi, daha üniform bir karışım oluşturulmasını sağlamaktadır ve silindir duvarının yakıt tarafından ısıtılışı azalır ve böylece yanma verimi iyileşir (Harada vd., 1998).

Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda daha yüksek güç yoğunlukları elde etmek için ÜÖN yakınlığında ikinci bir yakıt püskürtmesi denendi (Hashizume vd., 1998). Ön karışım fakir dolgu elde etmek için silindir kenarlarına yerleştirilmiş yakıt hüzmeleri birbirleriyle çarpışan iki enjektörün ve ÜÖN yakınlığında ilave yakıt püskürtmesi için silindir merkezine yerleştirilmiş (enjektör silindir kafasındadır) bir enjektörün kullanılması ile amaca ulaşıldı. Her bir safhada yaklaşık olarak yakıtın yarısı püskürtüldü (her bir safha için (toplamda) $\phi = 0.36$ ($\lambda = 2.8$)' ya tekabül edecek şekilde) ki ön karışımli yakıtın, vuruntuya neden olmadan kullanılacak maksimum miktarına yakın bir kısmı idi. Yakıt setan sayısının ve

her iki safha için püskürtme zamanlamalarının çeşitli kombinasyonları, performansı ve emisyonları optimize etmek için kullanıldı. İkinci safha klasik diesel yanmasına benzer şekilde gerçekleştiği için bu yaklaşımda, NO_x ve PM emisyonları arı HCCI operasyonu ile elde edilenlerden çok daha yüksekti. Bununla birlikte yakıt sarfiyatında önemli bir artış olmadan NO_x emisyonları, klasik diesel yanmasınıninkinin yaklaşık yarısına indirildi. Aynı zamanda duman emisyonları da azaldı fakat HC emisyonları daha yüksekti.

New ACE Enstitüsünde gerçekleştirilen yukarıdaki çalışmaların çok iyi bir tekrarı Akagawa'nın çalışmalarında görülebilir (Akagawa vd., 1999). Ayrıca Akagawa bu çalışmaların birçok yeni ilavelerini sunmaktadır. En üstteki piston segmanı, yarık hacmini azaltmak için kaldırıldı. Yarık hacmi azaltılışının HC ve CO emisyonlarının daha düşük bir mertebeye çekilmesi için yararlı olduğu gösterildi. Soğutulmuş EGR'nin HCCI üzerine etkisi araştırıldı ve HCCI yanma fazını geciktirmek için soğutulmuş EGR'nin yararlı olduğu gösterildi. Böylece HCCI yanma fazı ÜÖN yakınlarında gerçekleşti (Soğutulmuş EGR vasıtasıyla yaklaşık olarak 10° krank açısı değişim sağlandı). Yanma fazı üzerine katkı maddelerinin etkilerini belirlemek için birçok yakıt katkı maddesi, diesel yakıtı ile karıştırıldı. Bu katkı maddeleri dimetil karbonat, dietilen glikol dimetil eter, MTBE ve etanoldür. Düşük setan sayılarına sahip olan MTBE'nin ve etanolün, aşırı derecede gelişmiş HCCI yanmasını önlemek için elverişli oldukları belirlendi. Daha yüksek çıkış güçleri elde etmek için erken direkt püskürtmeli HCCI operasyon sahasının genişletilmesi aynı zamanda tartışıldı. Havanın silindir içerisine doğal olarak emildiği koşullarda maksimum IMEP, klasik diesel yanmasınıninkinin yaklaşık %50' siyle sınırlıdır. Havanın silindir içerisine 86 kPa mertebesinde aşırı doldurulmasıyla (süperşarj yoluyla) maksimum IMEP, havanın silindir içerisine doğal olarak emildiği tam (ağır) yükteki klasik diesel yanmasınıniki ile kıyaslanabilir seviyededir.

New ACE Enstitüsündeki daha yeni araştırmalar, erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunun çeşitli yönlerinin temelde daha iyi anlaşılması üzerine odaklandı. Bu araştırmalar şunlardır: gaz yakıtlar kullanılarak tam karışimli HCCI operasyonunun elde edildiği erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonlarının kıyaslamaları (Shimazaki vd., 1999), yakıt hüzmelerinin ve silindir içi akışın bilgisayarla modellenmesi (Miyamoto vd., 1999; Tsurushima vd., 2000; Lee vd., 2000), her bir kenar enjektöründen sadece bir yakıt hüzmelerinin geldiği bir alternatif çarpışan yakıt hüzmeleri tekniğinin geliştirilmesi ve bu yakıt tedariki tekniğinin, iki safhalı püskürtmenin dahil edildiği biçimde geliştirilmesi (Nishijima vd., 2001), ısı kaybının termodinamik analizleri ve araştırmaları (Tsurushima vd., 2001, 2002).

3.3.2 Hino Motors, Ltd.

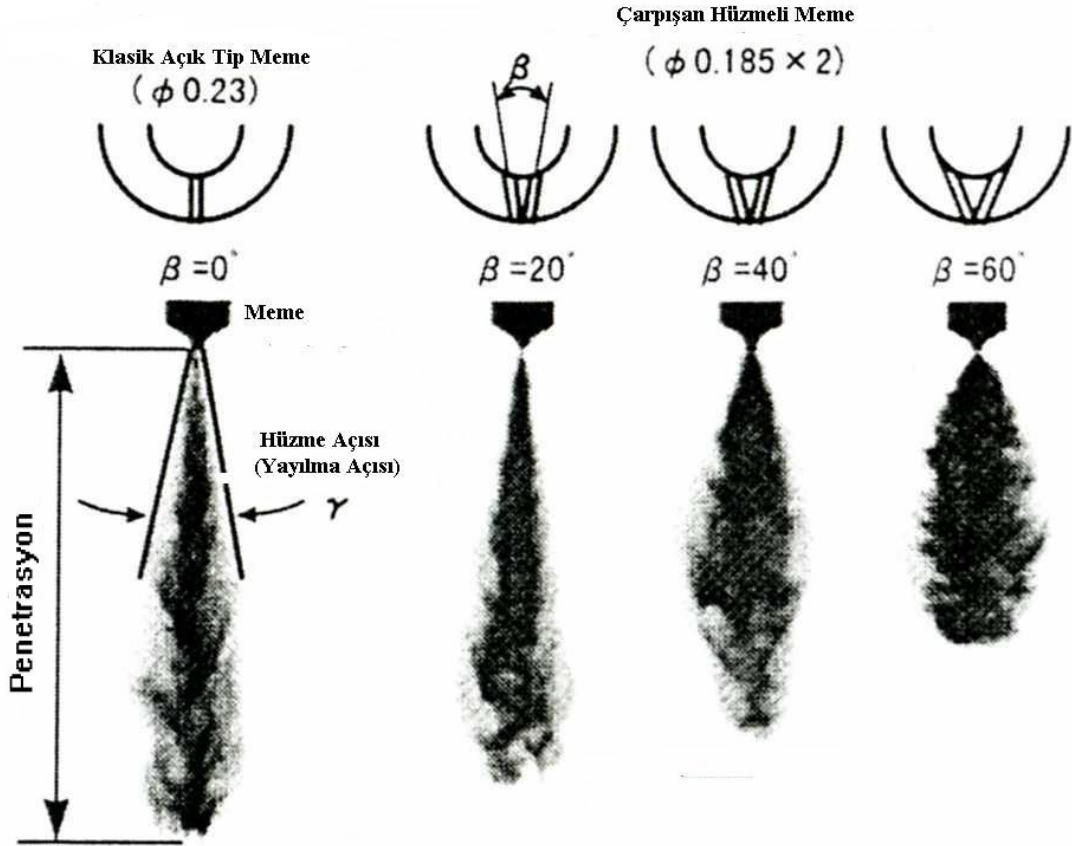
Erken direkt püskürtmeli yakıt püskürtmesi kullanılarak diesel motor emisyonlarının iyileştirilmesi için diğer bir öncü uygulama Yokota tarafından denendi (Yokota vd., 1997). Bu çalışmada erken (DI) püskürtmesi, iki yayılı püskürtme stratejisinin bir parçası olarak araştırıldı. 1) Yakıtın %50' si erken püskürtüldü ve diğer %50' si ÜÖN yakınlarında püskürtüldü. 2) Yakıtın %50' si erken püskürtüldü ve %35' i ÜÖN yakınlarında püskürtüldü ve %15' i üst ölü noktadan çok sonra püskürtüldü. Bu iki strateji arasındaki performans ve emisyon farkları büyük değildir. İlk testler 0.23 mm delik çaplı standart 6 delikli enjektör ucuyla gerçekleştirildi. Sadece erken püskürtme için veri yoktuysa da klasik diesel yanması için veri vardı. Erken püskürtmenin ve ÜÖN yakınlarındaki püskürtmenin bileşik uygulandığı durumların klasik diesel püskürtmesiyle yapılan kıyaslamaları, erken püskürtmenin neden olduğu değişimlere işaret eder. Yakıtın %50' sinin erken püskürtülmesiyle NO_x emisyonları yaklaşık olarak 800 ppm' den 200 ppm' e azaltıldı. Bununla birlikte duman ve HC emisyonları çok yüksekti ki HC emisyonları, 3000 ppm ile 8000 ppm aralığında seyir etti. Bu değerlerin erken püskürtme sırasında yakıtın aşırı nüfuziyetinden ötürü oluştuğu düşünüldü. Bu problemin üstesinden gelmek için özel bir enjektör ucu dizayn edildi. Bu enjektör ucu çeşitli açılarda yerleştirilmiş 0.10 mm çaplı otuz küçük deliğe sahiptir ki Takeda tarafından kullanılabenzerdir (Takeda vd., 1996). Bu çok delikli enjektörün kullanımı neticesindeki ısı açığa çıkış hızı, erken püskürtülen yakıtın yanmasının önemli derecede iyileşmiş olduğunu göstermektedir ve NO_x emisyonları hala 200 ppm seviyesindedir. Bununla birlikte bu çok delikli enjektörün ÜÖN yakınlarında püskürttüğü yakıt, uygun karışım oluşumunu (teşkilini) sağlamadığı için ikinci safha zayıf (verimsiz) yanmayla sonuçlandı. Buradan hareketle iki tip enjektör ucuna ihtiyaç olduğu sonucuna vardılar. Erken püskürtme için çok delikli bir enjektör ucu ve ÜÖN yakınlarındaki püskürtme için klasik bir enjektör ucu gereklidir.

Daha sonraki bir çalışmada bu bileşik erken ve ÜÖN yakınlarındaki püskürtme stratejisinin, seri üretim motorlarındaki emisyon hedeflerini karşılamak üzere tatbiki tartışıldı (Suzuki vd., 1997b). Erken püskürtülen yakıtın aşırı derecede gelişmiş tutuşmasını önlemek üzere MTBE' nin kullanımını gösteren veriler aynı zamanda mevcuttur.

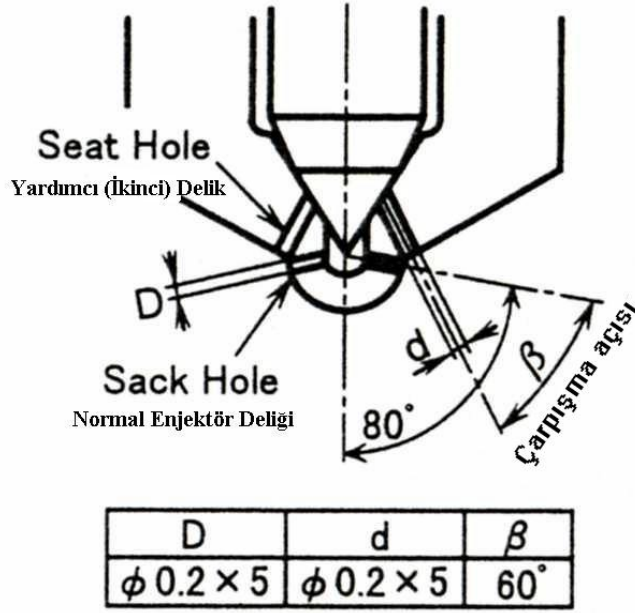
3.3.3 Mitsubishi Motors Corporation

Birçok kilit parametrenin araştırılmasını ve iyi işleyecek gibi görünen yeni bir çarpışan yakıt hüzmeleri konseptinin geliştirilmesi tartışmalarını içeren bir erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunun incelenen sonuçları sunuldu (Iwabuchi vd., 1999). Silindir cidarının yakıtla ıslatılmasını azaltmayı hedefleyen ilk çalışmalar, 40°, 80°, 120° ve 157° merkez açılı meme deliklerinden püskürtülen yakıtın deneysel sonuçlarını ve CFD analizlerini içermektedir. CFD

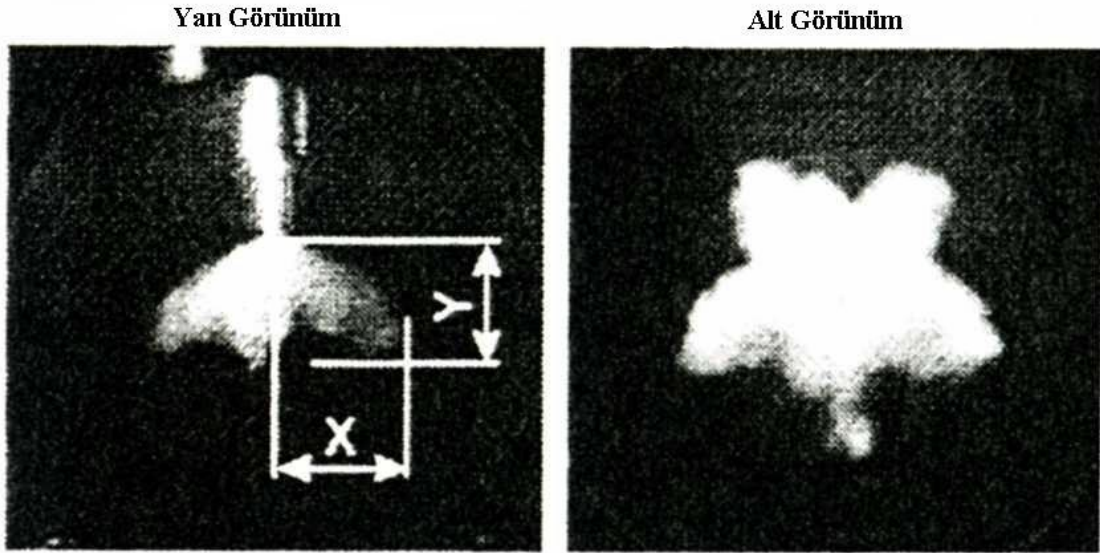
sonuçları, OH – radikallerinin kimyasal ışıltı ısıltı altındaki görüntüleri ve motor performansı verilerinin tümü 80° lik meme açısının en iyi sonucu verdiğini göstermektedir. Diesel yakıtı kullanıldığında oluşan aşırı gelişmiş yanma fazı problemini gidermek için normal diesel sıkıştırma oranı 12:1' e çekildi. 12:1' lik sıkıştırma oranının ve 80° lik enjektör ucunun kullanılmasıyla $\phi = 0.38$ ($\lambda = 2.6$)' e kadar uzanan yakıt yüklerinde ve üst ölü noktadan önce 40° ila 60° krank açısı gibi geç püskürtme zamanlamalarıyla (daha erken püskürtme zamanlamalarına istinaden geç) çok düşük NO_x emisyonları sağlandı. Bununla birlikte duman emisyonları çok yüksekti ve HC emisyonları 1000 ppm ila 2500 ppm arasındaki değerleriyle HCCI operasyonu için makul derecede yüksekti ve yakıt sarfiyatı klasik diesel operasyonundakinden daha fazlaydı.



Şekil 3.10 Çarpışan hüzmeli memenin hüzmeye karakteristikleri (1 çift çarpırtmalı delik)



Şekil 3.11 Motor testlerindeki çarpışan hüzmeli memenin yapısı (5 çift çarptırılmalı delik)



Şekil 3.12 Çarpışan hüzmeli memenin yakıt hüzmesi görünümü

Yanmayı iyileştirmek için memede yakıt hüzmelerinin birbirine çarptırılmasını sağlayan yeni bir enjektör ucu geliştirildi. Her bir normal enjektör deliğiyle bitişik ikinci bir delik açılır öyle ki yakıt hüzmeleri, 60° lik çarpışma açısıyla meme çıkışının hemen aşağısındaki bir noktada birleşir. Bu durum, geniş yayılma açılı yakıt hüzmelerinin oluşmasını sağlar ve yakıt

nüfuziyetini azaltır. Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda bu enjektörün kullanımı önemli iyileşmeler sağladı. Her ne kadar duman emisyonları 0' a yakın azaltıldı ise de ve yakıt sarfiyatı %10 iyileştirildi ise de ve düşük NO_x emisyonlarının sağlandığı koşullarda HC emisyonları önemli derecede azaltıldı ise de bu değerler, klasik diesel yanmasındakilerle kıyaslandığında hala yüksekti. Ayrıca vurutuyla sınırlı maksimum yük, EGR kullanılmadan HCCI operasyonu için rapor edilen en yüksek değerlerden biri olan $\phi = 0.45$ ($\lambda = 2.2$) mertebesine kadar çıkartılabildi. Daha ağır yüklerde vurutusuz çalışma sağlanabilse bile belli bir ağır yük noktasının ötesinde eğer yakıt tedariki önemli derecede arttırılırsa yanma sıcaklıkları çok yüksek olacağı için bu ağır yük noktasında düşük NO_x operasyonu sınırına yaklaşılır (Iwabuchi vd., 1999; Akagawa vd., 1999). Aynı zamanda yanma katalizörü (oksidasyon katalizörü) kullanımı incelendi ve yanma katalizörü kullanımının, HC emisyonlarının yanma katalizörünün kullanılmadığı klasik diesel operasyonundaki HC emisyonlarıyla kıyaslanabilir seviyelere azaltılmasında etkili olduğu bulundu. HCCI operasyonunda katalizörün iş görmesi için emme havasının silindire giriş sıcaklığı 470 K' nin üzerindedir.

12:1 gibi düşük sıkıştırma oranına rağmen yanma fazı hala gelişikti. Soğutulmuş EGR' nin kullanımı araştırıldı ve sıkıştırma oranının 13.5:1' e yükseltildiği durumlarda bile üst ölü noktadan çok sonra yanmayı sağlamak için soğutulmuş EGR kullanımının, yanma fazının kafi derecede değiştirilmesinde (geciktirilmesinde) etkili olduğu bulundu. Son olarak daha ağır yük operasyonları elde etmek için aşırı doldurma (süperşarj) denendi ve 80 kPa mertebesindeki emme havası basıncıyla şu sonuca ulaşıldı; havanın silindir içerisine doğal olarak emildiği tam yükteki klasik diesel operasyonunun çıkış gücüyle kıyaslanabilir çıkış güçleri elde edilebilir. Bu çalışma koşulunda NO_x emisyonları klasik diesel yanmasındakinden %90 daha düşüktür, duman emisyonları 0' a yakındır ve yakıt sarfiyatı, havanın silindir içerisine doğal olarak emildiği geciktirilmiş püskürtme zamanlamalı klasik diesel yanmasıyla kıyaslanabilir seviyededir.

3.3.4 Toyota Motor Corporation

Toyota' nın UNIBUS (UNIform BULky combustion System) yanma sistemi Japon pazarındaki bazı taşıtlarda 2000 yılında uygulamasına başlanılan bir erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonu tekniğidir (Yanagihara, 2001a). Bu tekniğin uygulanmasıyla motor, yaklaşık olarak orta (yarı) yüklere ve orta (yarı) hızlara kadar UNIBUS modunda çalışır. Bu teknik, üst ölü noktadan yaklaşık 50° krank açısı önce bir erken püskürtmenin ve üst ölü noktadan yaklaşık 13° krank açısı sonra bir geç püskürtmenin bileşimini kapsar. Bu iki safhalı

püskürtme tekniği, önce ki kısımlarda anlatılan [Hashizume vd. (1998) ve Yokota vd. (1997)]' nin çalışmalarındaki daha çok geliştirildi ve şu da bilinmelidir ki orijinal UNIBUS sistemi, bu diğer iki çalışmadan daha öncesi olan bir çalışmadır. Suzuki vd.' nin (1997b) çalışmalarını destekleyen direkt püskürtmeli diesel yakıtlı HCCI konseptleri, 1995 yılında hem Toyota hem de New ACE Enstitüsü tarafından tanıtıldı. Uluslararası literatürde UNIBUS yanma sistemi hakkında ne yazık ki bilgi kıtlığı söz konusudur ve hatta Yanagihara' nın 2001 seneli son makalesi UNIBUS yanma sisteminin birçok yönünü açıklamamaktadır.

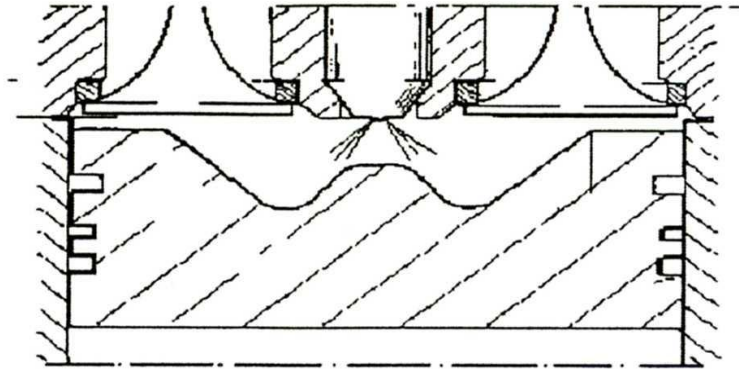
Diğer direkt püskürtmeli HCCI tekniklerinde olduğu gibi karışımın hazırlanması çok önemli bir konudur. Seri üretim motorlarında yeterli karışım oluşumu, açık tip memeli klasik bir yüksek basınçlı Common-Rail püskürtme sistemiyle elde edilmektedir. Bununla birlikte Yanagihara aynı zamanda birçok püskürtme denemesinde kapalı tip memelerin ve klasik açık tip memelerin modifiye edildiği araştırmalar hakkında bilgi vermektedir. Makalede sunulan verilerin çoğunluğu, muhtemelen ön karışımlı yakıtın aşırı derecede gelişmiş yanmasını (erken tutuşmasını) önlemek üzere 12:1' lik bir sıkıştırma oranında elde edilmiş. Bununla birlikte seri üretim motorunda kullanılan sıkıştırma oranı verilmemektedir. Aynı zamanda EGR' nin kullanımı tartışılmaktadır ve %60' lık bir EGR seviyesinin, HCCI yanma prosesinin geciktirilmesinde yaklaşık 7° krank açısı kadar etkisi olduğu gösterilmektedir. Yakıt setan sayısının 68' den 45' e düşürülmesi benzer şekilde yanma prosesini yaklaşık 7° krank açısı kadar geciktirmektedir.

Üst ölü noktadan 13° krank açısı sonra ikinci bir püskürtmeyle yakıtın %50' sinin sağlandığı bir iki safhalı püskürtme stratejisi geliştirildi. Motor yapısının ve çalışma koşullarının detayları açıklanmadı. Bununla birlikte mevcut veriler şunu belirtir; erken püskürtme zamanlamasının (~ 50° ÖÜÖN) uygun ayarı, ön karışımlı yakıtın üst ölü noktadan yaklaşık 10° krank açısı önce başlayan ve üst ölü noktadan sonraki 25°. krank açısının ötesine uzanan bir aşamalı ısı açığa çıkış prosesine neden olur. İkinci püskürtmeli (2. yanma safhalı) ve ikinci püskürtmesiz ısı açığa çıkış hızlarının kıyaslamaları şunu gösterir; ikinci püskürtmenin neden olduğu yanma üst ölü noktadan sonraki 20°. krank açısından az sonra başlar ki birinci yanmadaki (1. yanma erken püskürtme sonucudur) ısı açığa çıkışının sonlanmasının biraz öncesidir. İkinci püskürtme, HC emisyonlarını yaklaşık 5000 ppm' den 2000 ppm' in altına düşürerek ve CO emisyonlarını yaklaşık 8000 ppm' den 2000 ppm' e düşürerek erken püskürtülen yakıtın yanma verimini önemli derecede iyileştirir. Bu nedenlerden ikinci püskürtmeden gelen yakıtın yanması, erken püskürtülen yakıtın açığa çıkan ısısının bir kısmı için bir tetikleyici olarak kabul edilebilir. Ayrıca bu modda çalışıldığında yanmanın görünümüleri, her iki birinci veya ikinci püskürtmelerden gelen yakıtın yanmasında hiçbir is

parlaklığını (gazışıllığını) göstermez ve duman seviyeleri düşüktür. Her ne kadar ikinci püskürtme sadece erken püskürtmenin uygulanmasıyla elde edilen 0' a yakın NO_x emisyon seviyelerini yukarılara taşısa da NO_x emisyonları hala bir diesel motoru için çok düşüktür. Seri üretim motoru UNIBUS modunda çalışırken seri üretim motorunun bir sürüş çevrimi olan Japon test modunda 70 ppm' den daha düşük NO_x emisyonlarına sahip olduğu belirlendi.

3.3.5 IFP (Institut Francais du Pétrole)

Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonu için yeni ve umut verici bir yaklaşım şu yakınlarda IFP' de tanıtıldı (Walter vd., 2002). Bu yaklaşım HCCI operasyonu için daha optimal olan bir ayarın temin edilmesinde, tüm yanma sisteminin tekrar dizayn edilmesini içermektedir fakat buna rağmen tekrar dizayn edilen yanma sistemi, ağır yüklerde ve yüksek hızlarda kullanılacak olan klasik diesel yanmasında (operasyonunda) iyi işlemektedir. Yanma sisteminde iki büyük değişiklik yapıldı. Birinci değişiklik şudur: 100° den daha küçük merkez açılı dar bir yakıt hüzmeleri konisi oluşturmak için meme delikleri aşağıya doğru yönlendirilmiş yüksek basınçlı bir Common-Rail yakıt enjektörü kullanıldı. Bu uygulamadaki yakıt hüzmelerinin konik açı değeri, daha önceden tartışıldığı üzere Iwabuchi vd. (1999) tarafından belirlenen optimal yakıt hüzmeleri açısıyla uyumaktadır. İkinci değişiklik şudur: dar koni açılı enjektörün kullanıldığı klasik yanma modunda iyi yanma elde etmek için piston oyuğu tamamen tekrar dizayn edildi. Piston oyuğunu tekrar dizayn etme teşebbüsü, ana oyuk şeklinin verilmesinde ve yeni oyuğun test edilmesinde CFD aletlerinin esaslı kullanımını kapsamaktadır ve piston oyuğunun tekrar dizayn edilmiş hali, daha iyi performans sağlamaktadır. Temel sıkıştırma oranı 16:1 olarak belirlendi ki bu sıkıştırma oranı, tüm klasik modlu yanma testleri için kullanılmaktadır.



Şekil 3.13 NADI™ (Narrow Angle Direct Injection) yanma sisteminin genel görünümü

HCCI modlu operasyonda 16:1' lik temel sıkıştırma oranında aşırı derecede gelişmiş kendi kendine tutuşma prosesini önlemek için soğutulmuş EGR' nin yüksek seviyeleri gereklidir. Bu konfigürasyon, 1500 d/dak.' da 4 bara kadar ulaşan bir IMEP değerine olanak verdi. IMEP' in 2 bar olduğu daha düşük yüklerde yakıt sarfiyatı klasik diesel referansından sadece biraz yüksekti. Bununla birlikte IMEP 4 bar olduğunda yakıt sarfiyatı yaklaşık %8 arttı. Daha ağır yüklerde HCCI operasyonunu elde etmek için sıkıştırma oranı 14:1' e düşürüldü ki bu sıkıştırma oranı, daha düşük EGR seviyeleriyle iyi (uygun) yanma fazına (tutuşma zamanlamasına) olanak sağladı. Bu konfigürasyon, IMEP' i 6 bara kadar ulaşan yüklerde çalışılmasına olanak sağladı ve yanma verimini önemli derecede iyileştirdi ki IMEP 5 bar olduğunda %98' lik bir yanma verimi elde edildi. Değişken supap hareketi, bir seri üretim motorundaki etkin sıkıştırma oranını değiştirmenin potansiyel bir yolu olarak tartışıldı. Motor performansı aynı zamanda 2500 d/dak.' da test edildi. Bu daha yüksek hızda iyi HCCI yanma prosesi, daha ağır yüklerde elde edilebildi. 16:1' lik sıkıştırma oranında IMEP 6 bara ulaştığında ve 14:1' lik sıkıştırma oranında IMEP 9 bara ulaştığında 18:1 sıkıştırma oranlı klasik diesel yanmasına göre yakıt sarfiyatı önemsiz miktarda yüksekti. IMEP' in 5 barın üzerinde olduğu HCCI operasyonlarında emme havası basıncı derece derece artırıldı fakat emme havası basıncı bu yüklerde çalışan klasik bir diesel motorundaki değerlerin daima aşağısında tutuldu. Rapor edilen tüm HCCI koşullarında NO_x ve PM emisyonları, klasik bir diesel motorundakinden sırasıyla yaklaşık 100 ve 10 defa daha düşüktü. CO ve HC emisyonları klasik bir diesel motorundakinden daha yüksekti fakat bu CO ve HC emisyonlarının, direkt püskürtmeli benzinli bir SI motorundakiyle kıyaslanabilir seviyede olduğu belirlendi.

Diğer bir ilgi çekici sonuç 2000 yılında Walter vd. tarafından açıklandı. Kendi yanma sistemlerinde püskürtme zamanlamasındaki varyasyonlar, bir dereceye kadar yanma fazını değiştirmek için kullanılabilir. Klasik diesel yanma prosesinde püskürtme zamanlaması ve yanma fazı arasında direkt bir korelasyon vardır ki bu durumun, HCCI operasyonlarında geçerli olmadığı yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır fakat püskürtme zamanlamasındaki o değişiklikler, yakıtın kademelenişindeki değişimlere sebep olup kendi kendine tutuşma zamanlamasını değiştirmek için kullanılabilir. Bir incelemede püskürtme zamanlamasındaki değişikliğin yanma fazında yaklaşık olarak 10° krank açısı mertebesinde bir değişime neden olduğu görüldü.

3.4 Geç Direkt Püskürtmeli HCCI Operasyonu

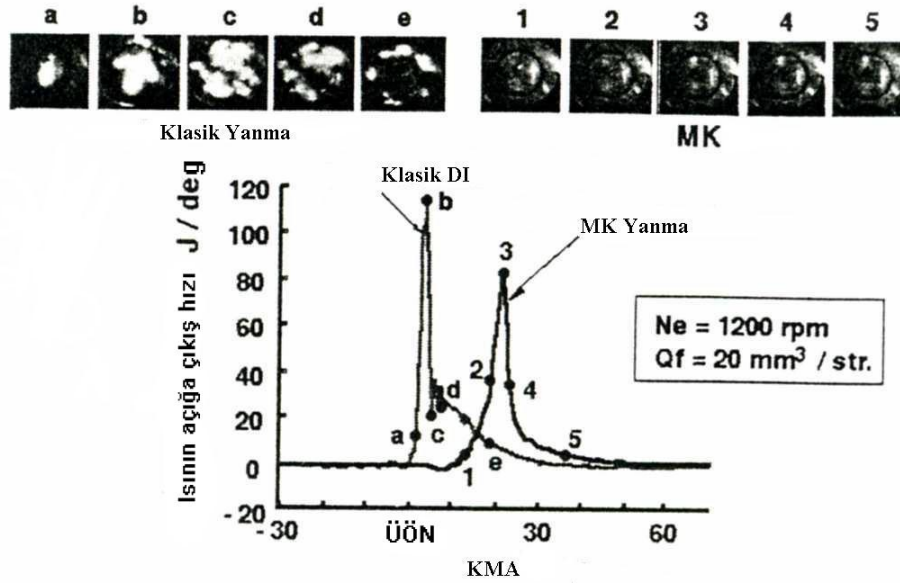
3.4.1 Nissan Motor Company

Diesel yakıtlı HCCI operasyonunun elde edilmesi için bugüne kadar ki en başarılı sistemlerden biri, Nissan Motor Şirketi tarafından geliştirilen ve MK (modulated kinetics) olarak bilinen geç direkt püskürtmeli HCCI tekniğidir. Genelde düşük yüklere ve düşük hızlara kapalı olan bu yanma sistemi, Nissan'ın yüksek hızlı (devirli) direkt püskürtmeli diesel motorunun yeni bir türünün bir parçası olarak uluslararası literatürde açıklandı (Mase vd., 1998). Bu motorun 1998 yılında Japon pazarı için üretimine başlandı (Kimura vd., 1999a).

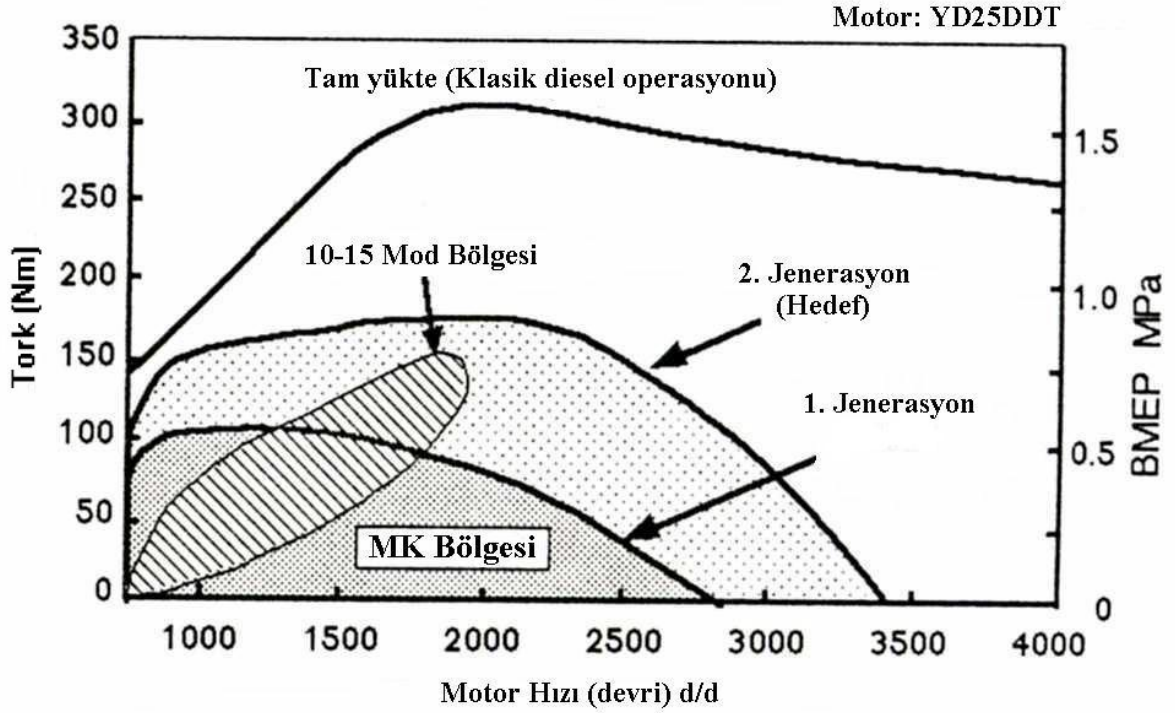
Bu geç direkt püskürtmeli HCCI yanma prosesinin temel kuralları tanımlandı (Mase vd., 1998; Kimura vd., 1999a). HCCI operasyonu için gerekli seyreltik homojen karışımı elde etmek üzere yakıtın tümü, kendi kendine tutuşma prosesinden önce püskürtülmüş ve silindir içi gazlarla iyice karışmış olmak zorundadır. Bu durum, uzun bir tutuşma gecikmesi süresini ve hızlı karışım oluşumunu gerektirmektedir. Püskürtme zamanlamasının ÜÖN'ün 7° krank açısı öncesinden ÜÖN'ün 3° krank açısı sonrasına geciktirilmesiyle ve EGR'nin yüksek seviyelerinin kullanımıyla tutuşma gecikmesi süresi uzatılmaktadır. EGR'nin kullanımıyla silindir içi gazlarındaki oksijen yüzdesinin %15 – %16' lara düşürülmesi (havadaki O_2 yüzdesi %21) tutuşma gecikmesi süresinin uzatılması için yeterlidir. Yüksek türbülans oranlarının ve toroidal bir yanma oyuğunun bileşik etkisiyle hızlı karışım oluşumu sağlanmaktadır. Her ne kadar türbülans oranı konsept motorda sadece 5'e yükseltildi ise de seri üretim motorundaki emme manifoldları 12 gibi yüksek türbülans oranlarının oluşturulması için dizayn edilmiştir ki bu emme manifoldları, klasik diesel operasyonu için türbülans oranının 3.5 mertebesine kadar kontrol edilebilir olmasına da olanak sağlamaktadır (Kawashima vd., 1998; Mase vd., 1998). Birinci jenerasyon MK sisteminin çalışma sahası, azami (pik) torkun yaklaşık üçte biriyle ve orta hız seviyeleriyle sınırlıdır. MK modunda NO_x emisyonları, PM emisyonlarında herhangi bir artış olmadan yaklaşık 50 ppm seviyesine azaltılmaktadır. Yanma gürültüsü aynı zamanda önemli derecede azaltılmaktadır. Ayrıca bu geç direkt püskürtmeli HCCI tekniği, klasik bir diesel motordakine benzer şekilde yanma fazının püskürtme zamanlaması vasıtasıyla kontrol edilmesini sağlar ki (MK yanma prosesinin sağlanabildiği püskürtme zamanlamalarının limitleri dahilinde) bu olay, ön karışimli ve erken direkt püskürtmeli HCCI tekniklerine göre geç direkt püskürtmeli HCCI tekniğinin bir üstünlüğüdür.

Çizelge 3.2 Test motorunun özellikleri

| | | |
|-------------------|---------------|-----------------------------------|
| Motor Tipi | | Tek silindirli direkt püskürtmeli |
| Emme Sistemi | | Süperşarjlı sistem |
| Çap x Strok | | Ø 85 mm X 86 mm |
| Motor Hacmi | | 488 cm ³ |
| Sıkıştırma Oranı | | 18:1 |
| Türbülans Oranı | | 3 ~ 5 |
| Püskürtme Sistemi | Pompa Tipi | Yüksek basınçlı VE |
| | Enjektör Tipi | Ø 0.22 mm X 5 VCO |

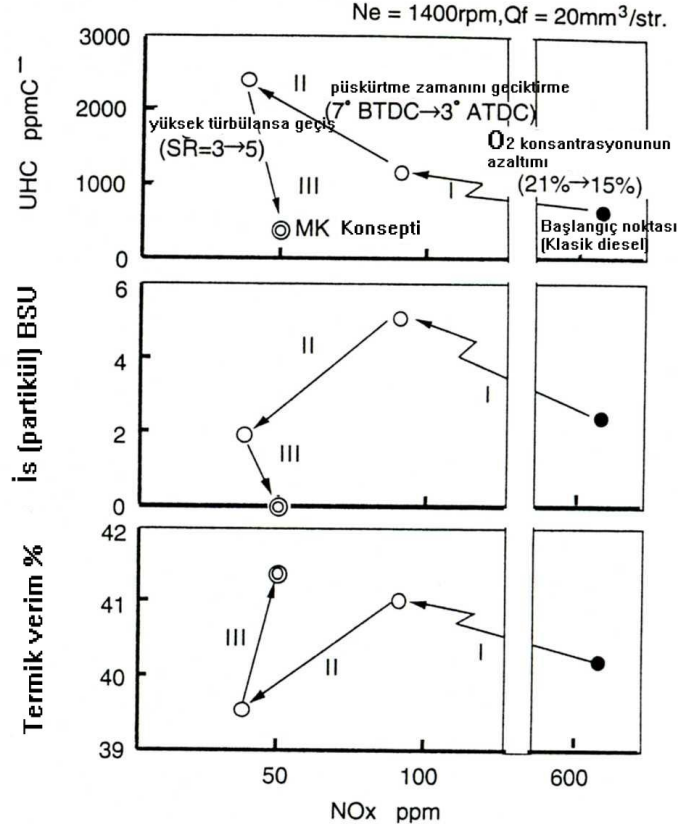


Şekil 3.14 Isı açığa çıkış hızının ve yanma fotoğrafının kıyaslanması



Şekil 3.15 Birinci jenerasyon ve hedeflenen MK konsept bölgesi (YD25DDT)

MK konseptindeki her bir yanma faktörünün egzost emisyonlarına ve termik verime olan etkisi, Şekil 3.16' da teker teker gösterilmektedir. Düşük oksijen konsantrasyonu ile NO_x emisyonları yaklaşık olarak %90 mertebesinde azaltılmaktadır ve geciktirilmiş püskürtme zamanlaması, duman (is) emisyonlarını belirgin bir şekilde düşürmektedir. Ayrıca yüksek türbülans oranının, duman ve yanmamış HC emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğu görülmektedir. Şekil 3.16, her bir yanma faktörünün termik verime olan etkisini göstermektedir. NO_x emisyonlarının azaltılmasında bariz bir etkiye sahip olan düşük oksijen konsantrasyonu ile termik verim iyileşmektedir bununla birlikte termik verim, geciktirilmiş püskürtme zamanlaması ile kötüye gitmektedir. Yüksek türbülans oranı, termik verimi klasik diesel operasyonun üzerindeki bir değere taşımaktadır.



Şekil 3.16 Her bir yanma faktörünün egzost emisyonlarına ve termik verime etkisi

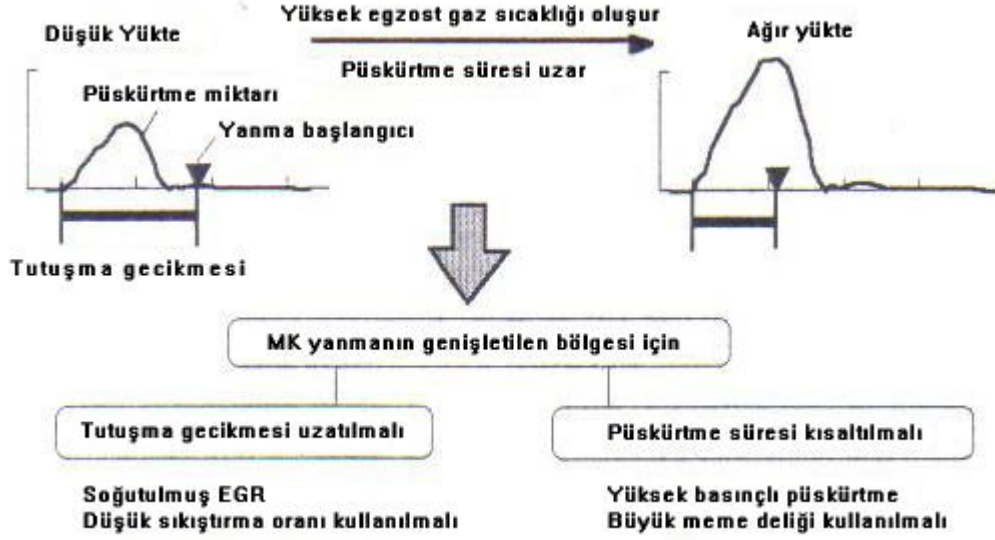
İlginç bir şekilde termik verim, MK operasyonunda yanma fazı önemli derecede geciktirilmiş olmasına rağmen klasik diesel operasyonuna göre hafifçe arttı. Termik verimdeki bu iyileşme, azalan ısı transferine atfedildi. Bu düşüncüyü doğrulamak için sıkışma bölgesindeki piston oyuğu üzerine ve yanma oyuğunun yan duvarları üzerine ısı akısı sensörleri yerleştirildi (Kimura vd., 1999a; Ogawa vd., 2000). Isı akısı ölçümleri, motor operasyonu MK moduna değiştirildiğinde pistona doğru olan ısı transferinin önemli derecede azaltıldığını gösterdi. Her ne kadar azalan ısı kayıplarının nedeni açıklanamasa da MK modunda hiçbir parlak yanmayı göstermeyen yanma görünümlerine dayanarak radyasyonla ısı transferinin büyük ölçüde azalmış olduğu tahmin edilmektedir. Eğer yanma esnasında piston oyuğu duvarı yakınlarda yüksek sıcaklıklı alevlerin bulunmayışı (Ogawa vd., 2000) ve yanma esnasındaki düşük akımlı dolgu (sıvı) hareketi, arttırılmış türbülansın etkilerini frenlemekte ise ayrıca konveksiyonla ısı transferi azalan olabilir.

İkinci jenerasyon MK sisteminin geliştirilmesi için çeşitli modifikasyonlar yapıldı. Bu modifikasyonlarla MK sisteminin operasyon sahası, daha ağır yüklere ve daha yüksek hızlara genişletildi (Kimura vd., 2001). Daha ağır yüklerde daha çok yakıtın püskürtülmesi

zorunluluğu olduğu için MK operasyonunun gerekli koşulunun yerine getirilmesi giderek daha zorlaşır ki bu koşul, yakıt püskürtme süresinin tutuşma gecikmesi süresinden daha kısa olması zorunluluğudur. Bu maksatla yüksek basınçlı bir Common-Rail yakıt sistemi, tüm hızlarda yüksek püskürtme basınçları sağlaması için kullanılmaktadır. Sıkıştırma oranının 17.5:1-18:1' den 16:1' e azaltılmasıyla ve silindire gönderilen EGR gazının soğutulmasıyla sıkıştırma stroku sonundaki ÜÖN yanma sahasının gaz sıcaklığı düşürülerek tutuşma gecikmesi süresi arttırılmaktadır. Yukarıdaki değişikliklerin sonucu olan daha düşük sıkıştırma sonu sıcaklıklarında sıvı yakıtın piston oyuğu duvarına çarpma potansiyelini minimize etmek üzere piston oyuğu çapı 47 mm' den 56 mm' ye arttırıldı. Bu değişiklik, soğuk motor koşulları altında HC emisyonlarını önemli derecede azaltmaktadır.

Çizelge 3.3 Test motorunun özellikleri

| | | |
|-------------------|---------------|--|
| Motor Tipi | | 4 Silindirli direkt püskürtmeli |
| Emme Sistemi | | Turboşarjlı sistem |
| Çap x Strok | | Ø 89 mm x 100 mm |
| Motor Hacmi | | 2488 cm ³ (622 cm ³ /silindir) |
| Sıkıştırma Oranı | | 17.5:1 , 16:1 |
| Yanma Odası | | Toroidal |
| Türbülans Oranı | | 3.6 ~ 10 |
| Püskürtme Sistemi | Pompa Tipi | Common Rail sistemi |
| | Enjektör Tipi | Ø 0.23 mm x 5 |



Şekil 3.17 MK yanma bölgesini genişletme yaklaşımı

Bu prototip ikinci jenerasyon MK sistemindeki maksimum yükler ve hızlar açık olarak belirtilmedi fakat makalede MK operasyonunun, günlük sürüş sahasının tümünde sağlandığı anlatılmaktadır. Buda şunu gösterir. Motor yaklaşık olarak orta (yarı) yükte ve 3/4' lük hız seviyesinde ikinci jenerasyon MK sisteminin hedeflerini karşılar ki bu operasyon bölgesi, Japon 10-15 test modunun tüm operasyon sahasını da kapsamaktadır. EGR' nin kullanılmadığı klasik diesel operasyonu ile kıyaslandığında NO_x emisyonlarının %98 oranında azalmış olduğu saptandı ve eldeki veriler PM emisyonlarının klasik diesel motorundakilerle aynı seviyede olduğunu göstermektedir. EGR' nin kullanıldığı klasik diesel operasyonu ile kıyaslandığında MK operasyonundaki NO_x emisyonları, EGR' li klasik diesel operasyonundaki en düşük değerlerden yaklaşık 4 ila 5 defa daha düşükken MK operasyonunda PM emisyonları ve yakıt sarfiyatı da önemli derecede daha iyidir. Her ne kadar MK operasyonundaki PM seviyeleri yoğun EGR' li klasik diesel operasyonundaki PM seviyelerinin çok aşağısında ise de bu MK operasyonundaki PM seviyelerinin, 2007 standartları tarafından zorunlu tutulan seviyelerin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum bir partikül filtresinin kullanımını gerektirebilir. İkinci jenerasyon MK operasyonu sahasında HC ve CO emisyonları görülmedi. 5-ışlevli bir katalizörün (5-ışlevli katalizör, oksidasyon katalizörünün, NO_x tutucu katalizörünün ve bir partikül filtresinin görevlerini yerine getirir) teçhiz edildiği bir otomobilde ikinci jenerasyon MK sisteminde yürütülen testler şunu gösterir ki MK modunda ULEV emisyon standartları ($NO_x < 0.07$ g/mil ve $PM < 0.01$ g/mil) karşılanabilmektedir.

3.5 HCCI Operasyonunun Kontrolü İçin Su Püskürtülmesi

Diesel yakıtlı HCCI operasyonunun kontrol edilmesinde ve HCCI operasyon sahasının daha ağır yüklerle genişletilmesinde potansiyel bir vasıta olarak son zamanlarda silindir içerisine direkt su püskürtülmesi araştırıldı (Nishijima vd., 2002; Kaneko vd., 2002). Her iki çalışmada da suyu silindire göndermek üzere silindir merkezine yerleştirilmiş (enjektör silindir kafasındadır) DI enjektörleri kullanıldı. Bununla birlikte bu çalışmalardaki su enjektörü tipleri, yakıt tipleri ve yakıt tedariki stratejileri önemli derecede farklıdır. Bu farklılıklara rağmen suyun, HCCI yanma prosesi üzerinde değişmeyen (benzer) bir etkisi olduğu keşfedildi.

Silindir kenarlarına yerleştirilmiş yakıt hüzmeleri birbiriyle çarpışan iki enjektörle direkt püskürtmeli (DI) yakıt tedariki tekniği uygulandı (Nishijima vd., 2002). Su püskürtmek üzere silindir merkezine yerleştirilmiş (enjektör silindir kafasındadır) bir kapalı tip enjektör kullanıldı. Bu enjektörle oldukça uniform bir su hüzmesi dağılımı sağlandığı yüksek hızla çekilen fotoğraflara bakılarak anlaşıldı. Fakir bir karışım oluşturmak için yakıtın yarısının erken püskürtüldüğü (püskürtme zamanlamaları ÜÖN' dan önce 60° ila 30° krank açısı arasında değiştirildi) ve yakıtın diğer yarısının ÜÖN' da püskürtüldüğü bir iki aşamalı yakıt püskürtme stratejisi kullanıldı. Erken püskürtülen yakıtın aşırı derecede gelişmiş yanmasını önlemek için setan sayısı 20 olan bir diesel yakıtı kullanıldı. Bu püskürtme stratejisi, sadece erken püskürtülen yakıtın HCCI benzeri bir modda yandığı bir iki safhalı yanma olayına neden oldu. İkinci püskürtmeden gelen yakıt, klasik diesel yanmasına benzer bir biçimde ÜÖN' dan sonra yandı. Sonuç olarak su kullanılmadığında NO_x emisyonları (250 ppm ila 500 ppm arasında) oldukça yüksek bir seviyededir. Normal diesel yanmasında olduğu gibi su püskürtülmesi, NO_x emisyonlarını büyük ölçüde azaltmaktadır ve NO_x emisyonlarındaki azalmalar, tedarik edilen suyun miktarıyla orantılı olarak artmaktadır. Aynı zamanda su püskürtme zamanlaması, NO_x emisyonlarının azaltılmasında önemli bir etkiye sahiptir. Su püskürtme zamanlamaları sıkıştırma strokunun daha sonlarına doğru çekildikçe (yaklaştırıldıkça) NO_x emisyonu azalmaları artmaktadır. Su püskürtme zamanlamasının sıkıştırma strokunun sonlarına doğru çekilmesi ile daha fazla suyun püskürtülmesi benzer NO_x azalmalarını sağlamaktadır. Su püskürtme zamanlamasının bu etkisi, şunu ortaya koymaktadır. Daha geç su püskürtme zamanlamalarıyla suyun dağılımı daha çok kademelenir ki bu kademelenme, sıcak yanma bölgelerinde lokal su konsantrasyonunu arttırmaktadır. Hem tedarik edilen suyun miktarına hem de su püskürtme avansının geciktirilmesine bağlı olarak HC ve CO emisyonları artar. HC ve CO emisyonlarındaki artıştan ötürü yanma verimindeki düşüşe rağmen su ilavesiyle yakıt sarfiyatı hafifçe iyileşir çünkü su ilavesi, HCCI yanma

fazının ÜÖN' nin daha yakınlarında gerçekleşmesini sağlayarak HCCI yanma fazını iyileştirmektedir. Aynı zamanda su ilavesi, pik ısının açığa çıkış hızını azaltır ve HCCI yanmanın süresini uzatır.

Emme manifolduna yerleştirilen 12 MPa püskürtme basınçlı bir kapalı tip enjektörle ön karışimli yakıt tedariki tekniği uygulandı (Kaneko vd., 2002). Ön karışimli HCCI operasyonu konusunda tartışıldığı üzere 20 °C' deki ısıtılmamış emme havası sıcaklığında diesel yakıtının buharlaşmasıyla ilgili problemleri önlemek üzere setan sayısı 27 olan hafif nafta yakıtı kullanıldı. Test motoruna orijinal diesel enjektörüyle (20 MPa açılma basıncında) su püskürtüldü. Su ilavesinin kendi kendine tutuşmanın geciktirilmesinde etkili olduğu anlaşıldı. Bu suretle su ilavesi, yanma fazını iyileştirdi. Aynı zamanda pik ısının açığa çıkış hızı azaltıldı ve ısının açığa çıkma süresi uzadı. Bu durum vuruntu sınırına ulaşılmadan çok daha ağır yüklerde çalışılmasına olanak sağlamaktadır. Spesifik olarak yakıt tedariki derecesi, su kullanılmazken ki $\phi = 0.19$ ($\lambda = 5.2$) değerinden su kullanımıyla yakıt kütle oranının ikiye katlandığı $\phi = 0.37$ ($\lambda = 2.7$) mertebesine çıkartılabildi. Bununla birlikte şu da belirtilmelidir ki yanma fazındaki hayli iyileşmeye rağmen vuruntuyu kontrol altına almak için gerekli olan miktardan daha çok su ilavesi, HC ve CO emisyonlarını arttırıp yanma verimini düşürdüğünden ötürü yakıt sarfiyatı için zararlıdır. Su püskürtme zamanlamasının ÜÖN' dan önce 20° krank açısından 60° krank açısına doğru ötelenmesiyle suyun, yanma fazı üzerindeki tesirliliği artmaktadır. Bununla birlikte su püskürtme zamanlamasının ÜÖN' dan önce 60° krank açısının daha ilerisine ötelenmesiyle muhtemelen suyun silindir cidarlarına çarpmasından ötürü suyun, yanma fazı üzerindeki tesirliliği azalmaktadır. Bu argüman, ÜÖN' dan önce 60° krank açısından daha erken gerçekleştirilen su püskürtme zamanlamalarında su vasıtasıyla yağlama yağının seyrelmesindeki artışın gözlenmesiyle doğrulandı. Tüm su püskürtme zamanlamalarında NO_x emisyonları (< 10 ppm) çok düşüktü ve duman emisyonları gözlenmedi fakat yakıt sarfiyatı, temel klasik diesel operasyonunkinden daha yüksekti.

3.6 Sonuç Yorumları

Diesel yakıtlı HCCI operasyonunu anlamak ve bu yanma prosesi için pratik sistemler geliştirmek üzere çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu araştırmalar, yakıtın veya yakıt/hava karışımının motora verilmiş şekliyle ve tutuşma zamanlamasının kontrolüyle ilgili birçok farklı konsepti kapsamaktadır. Her ne kadar her bir yaklaşım kendine has özelliklere ve problemlere sahip ise de yukarıdaki kısımlarda açıklanan sonuçlar şunu gösterir ki pratik diesel yakıtlı

HCCI yanma sistemlerinin gelişiminde ele alınması zorunlu olan birçok ortak temel konu vardır.

1. Diesel yakıtı düşük silindir içi ortam sıcaklıklarında kolayca buharlaşmaz. Bu nedenle uniform bir karışımın oluşturulması zordur. Ayrıca diesel yakıtının bu özelliği, eğer yakıt hızı aşırı nüfuz ederse veya dağınık damlacıklar silindir cidarıyla temas geçse bile silindirin iç yüzeylerinde yakıtın tortulanmasına neden olabilir ki bu durum, düşük yanma verimleriyle ve yüksek yanmamış HC emisyonlarıyla sonuçlanır. Yağlama yağının yakıt ile seyreltiği aynı zamanda ispatlandı. Bu problemin üstesinden gelmek için çok iyi kontrol edilen yakıt püskürtme ve karışım oluşumu proseslerinin kullanılması gereklidir. Erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonu için ÜÖN' nin çok uzağında bulunan nispeten düşük sıcaklıklı ve düşük yoğunluklu dolgudaki yakıtın nüfuziyetini azaltan ve dolgudaki yakıtın dağılımını arttıran birçok yeni konsept geliştirildi (Takeda vd., 1996; Harada vd., 1998; Iwabuchi vd., 1999; Nishijima vd., 2001; Walter vd., 2002). Geç direkt püskürtmeli MK tekniği, silindir içi ortam sıcaklıkları ve yoğunlukları klasik diesel operasyonundakinden sadece biraz daha düşükken yakıtı püskürterek bu problemin üstesinden gelmektedir (Kimura vd., 1999a, 2001).

2. Diesel yakıtı kolayca kendi kendine tutuşur. Diesel yakıtının bu özelliği, ön karışım ve erken direkt püskürtmeli yakıt tedariki tekniklerinde aşırı derecede gelişmiş tutuşmayla sonuçlanabilir ki bu durumda, termik verim düşer ve vuruntu için doğal eğilim artar. Geç direkt püskürtmeli MK yanmasındaki (operasyonundaki) kısa tutuşma gecikmesi süresi, yanma prosesinden önce ki yakıt püskürtme süresini ve karışım oluşumu süresini sınırlar. Bu problemi azaltmak için çeşitli teknikler araştırılmaktadır. Diesel yakıtlı HCCI konseptlerinin çoğu yüksek seviyede EGR kullanır ki böylece diesel yakıtı gibi iki safhada (düşük oksidasyon sıcaklığı 600 K, yüksek oksidasyon sıcaklığı 700 K) tutuşan yakıtların sabit emme havası sıcaklığında tutuşma gecikmesi süresi uzatılır. EGR' nin soğutulması genellikle gereklidir. Aynı zamanda diesel yakıtlı HCCI konseptlerinin çoğunda sıkıştırma oranları, tipik klasik diesel değerlerinin daha aşağısına düşürülür. Sıkıştırma oranının düşürülme derecesine bağlı olarak ilk hareket zorluğu klasik diesel operasyonunda görülebilir ve gerçekte var olan (fiili) sıkıştırma oranını değiştirmek üzere değişken supap hareketi gibi bir mekanizmanın kullanılması gerekebilir. Su püskürtülmesi (Nishijima vd., 2002; Kaneko vd., 2002) ve düşük setan sayılı yakıtların kullanımı aynı zamanda araştırılmaktadır ve tutuşma gecikmesi süresinin uzatılmasında bu uygulamaların, etkili olduğu görülmektedir.

3. Diesel benzeri yakıtların kullanıldığı ön karışım veya erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonlarında hız ve yük değiştiğinde yanma fazının hızlı bir şekilde kontrol edilmesi için

bazı tekniklere başvurulması gereklidir. Sadece geç direkt püskürtmeli MK operasyonu, klasik diesel operasyonundakine benzer bir şekilde yanma fazının püskürtme zamanlaması vasıtasıyla (MK yanmasının sağlanabildiği püskürtme zamanlamalarının limitleri dahilinde) direkt olarak kontrol edilebilmesine olanak sağlar. Her ne kadar püskürtme zamanlaması vasıtasıyla yanma fazı kontrolünün erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda da başarılmış olabilme ihtimali var ise de literatürde bu tür bir uygulamadan bahsedilmemektedir. Sadece Walter vd.'nin 2002 yılındaki çalışması şunu bildirir; püskürtme zamanlaması, yanma zamanlamasının kontrolünde önemli bir yarar sağlamaktadır. Bununla birlikte bu özlü açıklamadan püskürtme zamanlaması ve yanma fazı arasında direkt bir korelasyonun var olmadığı anlaşılmaktadır fakat püskürtme zamanlamasındaki o değişiklikler, yakıtın kademelenişindeki değişimlere sebep olup kendi kendine tutuşma zamanlamasını değiştirmek için kullanılmaktadır.

4. Daha yüksek çıkış gücü elde etmek için birçok araştırma grubu tarafından iki safhalı püskürtme stratejileri araştırılmaktadır. Bu iki safhalı püskürtme stratejileriyle aynı zamanda HCCI yanma prosesinin bazı yararlarında artış olmaktadır (Yokota vd., 1997; Hashizume vd., 1998; Suzuki, 1998; Odaka vd., 1999; Nishijima vd., 2001; Yanagihara, 2001). Bu iki safhalı püskürtme tekniklerinde 1. püskürtme ÜÖN' dan çok önce gerçekleştirilir veya 1. püskürtme emme manifolduna yapılır ve bu püskürtülen yakıtlar HCCI modunda yanar oysa 2. püskürtme ÜÖN yakınlığında gerçekleştirilir ve 2. püskürtmeden gelen yakıt genellikle klasik diesel yanmasına daha çok benzer bir biçimde yanar. Böylece NO_x emisyonları azaltılır fakat NO_x emisyonları, hala arı HCCI yanmasındaki (operasyonundaki) NO_x emisyonlarına göre yüksek olabilmektedir. İki safhalı püskürtme tekniklerinin belki de en başarılısı Toyota'nın UNIBUS yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda ikinci püskürtme, ÜÖN' dan sonra 13° krank açısı kadar geciktirilir ve toplam NO_x yaklaşık 70 ppm seviyesiyle hala oldukça düşüktür (Yanagihara, 2001). Aynı zamanda iki safhalı püskürtme tekniklerinin bir çoğunda ikinci püskürtme vasıtasıyla HCCI yanma prosesinin başlatılması için bir çaba harcanmaktadır ki bu suretle, yanma fazı kontrol edilebilir. İkinci püskürtmeden gelen yakıtın yanmasından çok önce HCCI yanma prosesi gerçekleştiği için bu konuda ki çabaların çoğu başarısızdır. Bununla birlikte %50' lik MTBE ve %50' lik diesel yakıtı karışımının kullanıldığı ön karışimli HCCI operasyonunda (ikinci püskürtme ÜÖN' dan 15° krank açısı önce) yanma fazının kontrolü sağlanabilmektedir (Odaka vd., 1999). Aynı zamanda Yanagihara şunu belirtir; ikinci püskürtme vasıtasıyla (ikinci püskürtme ÜÖN' dan 13° krank açısı sonra) erken direkt püskürtmeli HCCI operasyonunda (birinci püskürtme ÜÖN' dan yaklaşık 50° krank

açısı önce) ÜÖN' dan yaklaşık 10° krank açısı önce başlayan ısı açığa çıkış prosesinin son bölümlerinin kontrolüne ulaşılmaktadır (Yanagihara, 2001).

Diesel yakıtlı HCCI yanma sistemlerinin gelişimindeki önemli teknik engellere rağmen bu konudaki birçok çalışma oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Muhtelif teknikler ilerisi için umut vermektedir ve bu tekniklerden ikisinin ticari üretimine çoktan geçilmiştir. Bu teknikler, 1998' de seri üretimine geçilen geç direkt püskürtme stratejisini kullanan Nissan' nın MK sisteminden ve 2000' de seri üretimine geçilen erken direkt püskürtme stratejisini kullanan Toyota' nın UNIBUS sisteminden ibarettir. Her iki sistem de sadece düşük yüklerde ve düşük hızlarda genellikle HCCI benzeri modlarda çalışmaktadır ve bu düşük yük ve düşük hız sınırlarının ötesinde (dışında) bu sistemler, klasik diesel operasyonuna yeniden geri dönerler. Bununla birlikte HCCI motorların operasyon sahasının genişletilmesi için çalışmalar devam etmektedir ve muhtelif teknikler, ilerisi için umut vermektedir.

4. HCCI MOTORLAR İÇİN ALTERNATİF YAKITLAR VE YAKIT KATKI MADDELERİ

4.1 Genel Tanımlama

Bir HCCI motorunda tutuşma, yakıt/hava karışımının kendi kendine tutuşmasıyla meydana geldiği için yakıt tercihi, hem motor dizaynı hem de kontrol stratejileri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. HCCI motor konseptlerinin tümü yakıtın doğru zamanlamayla kendi kendine tutuşmasının sağlanması gereği çerçevesinde gelişecektir ki böylece iyi yanma fazının dolayısıyla hızlı bir ana yanmanın sonucu olarak yüksek yakıt ekonomisi ve düşük emisyonlar elde edilebilir. Kendi kendine tutuşma zamanlaması, yakıt/hava/art gaz karışımının (dolgunun) benzersiz reaksiyon kinetiklerine ve sıkıştırma prosesi sırasındaki sıcaklık, basınç ve bileşim kompozisyonuna bağlıdır. HCCI motorlar için önerilen seyreltim stratejilerinin, supap zamanlaması olaylarının ve yakıt püskürtme tasarımlarının tümü, yakıtın doğru zamanlamayla kendi kendine tutuşmasının sağlanmasında karşılaşılan problemleri ve bu doğru zamanlamalı kendi kendine tutuşma olayının tüm çalışma koşullarında çevrimden çevrime tekrarlanabilirliğinde karşılan problemleri ele alan farklı çarelerdir.

Şu açıkça anlaşılmaktadır ki HCCI operasyonu kısmi-yük çalışma koşullarıyla sınırlı kalacaktır. Daha ağır yüklere doğru yanma hızları giderek aşırılaşır ve pik basınç artış hızları gereğinden çok büyüktür ve motor gürültüsü kabul edilemez seviyelere ulaşır. Diğer taraftan boşta çalışma koşullarının karakteristiği olan daha düşük yüklerde, pik gaz sıcaklıkları HCCI yanmada gereğinden fazla düşüktür. Bu durum CO ve HC emisyonlarının artmasına neden olur (Dec, 2002). Sonuç olarak binek taşıtındaki HCCI motoru doğal olarak bir çok modlu motor gibi çalışacaktır. Boşta ve boşa yakın yüklerde motor, bir buji ateşlemeli veya bir diesel motor gibi çalışacaktır. Çalışma rejiminin ortalarında motor, HCCI yanmasını kullanacaktır ve daha ağır yüklerde motordan tam-yük performansının elde edilebilmesi için yanma modu, geleneksel SI alev yayılımından veya diesel yanmasından birine geçecektir. Bu nedenle bir HCCI motoru için gerekli olan yakıt karakteristikleri tüm operasyon rejimi için de son derece önemlidir. Düşük yüklerde HCCI operasyonunun tüm koşullarının yerine getirilmesine ilave olarak yakıt, aynı zamanda tam-yük operasyonunda performans kriterlerini karşılamak zorundadır. Benzin için yukarıdaki ifade şunu kasteder; benzin, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık koşulları altında kolayca kendi kendine tutuşmak zorundadır veya başka bir deyişle düşük oktan sayısına sahip olmalıdır. Oysa ki ağır yüklerde SI (buji ateşlemeli) alev yayılımı operasyonu zarfında vuruntunun önlenmesi için benzinin yüksek oktan sayısına sahip olması istenir. Diesel yakıtının gereksinimleri benzininkinin tam tersidir. Tam-yük

koşullarında kısa süreli bir tutuşma gecikmesi sağlayan bir yakıtın kullanılması istenir ki bu durum, diesel yakıtının yüksek setan sayılı olmasını gerektirir. Diğer taraftan diesel yakıtlı HCCI yanma prosesinde ÜÖN' nın yakınlıklarına kadar tutuşmanın geciktirilebilmesi için diesel yakıtının düşük setan sayılı olması istenir.

Anlatılan farklı yakıt performansı gereksinimlerinin motorun tüm hız ve yük aralığı boyunca iyi performans elde edilebilmesi için kaçınılmaz olmasından ötürü potansiyel senaryolardan biri HCCI motorunun bir çift yakıtlı motor olmasıdır. Klasik benzin veya diesel yakıtı daha ağır yüklerde kullanılırken diğer yakıt HCCI operasyonu için uygun hale getirilmiş kendi kendine tutuşma karakteristiklerine sahip olacaktır. Piyasada var olan birçok alternatif yakıttan herhangi biri HCCI motoru için potansiyel olabilir. Çift yakıtlı bir motorda kullanılan yakıtların, benzer özelliklere sahip olması ve aynı yakıt enjektörü tarafından tevzi edilebilmesi istenir. Böylece ilave bir yakıt sisteminin maliyet yükünden kaçınılmış olunur. Motorun HCCI yanma moduna giriş ve çıkışlarında yakıt değişikliğinin hızlı bir şekilde sağlanabilmesi, bir diğer çözülmesi gereken önemli konudur. İki çeşit yakıt kullanılmasına bir alternatif olarak HCCI motorlarda kendi kendine tutuşma, aynı zamanda yakıtı modifiye ederek de kontrol altına alınabilir öyle ki tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden bir katığın ilavesiyle yakıt kimyasal olarak daha fazla reaktiftir. Şu bilinmektedir ki organik nitratların veya organik peroksitlerin az miktardaki ilaveleriyle diesel yakıtının tutuşma gecikmesi süresi önemli derecede kısaltılır (Schwab vd., 1999; Lee vd., 2000). Taşıt üzerinde bir yakıt karışım sisteminin kullanılmasıyla benzine tutuşma arttırıcı katık ilave edilmesi veya diesel yakıtına tutuşma frenleyici katık ilave edilmesi mümkün olabilir. Taşıt üzerindeki yakıt iyileştirici katık uygulamalarının gelişimi, yakıtın daha reaktif bir yapıda olması için diğer bir potansiyel çözüm olabilir. Bir yakıt iyileştirici katık geliştirilmeden önce oksinatlar ve peroksitler gibi çeşitli bileşiklerin HCCI yanma üzerine olan etkilerinin anlaşılması gereklidir. Diesel yakıtının tutuşma gecikmesi süresi üzerine yakıt katkı maddelerinin etkilerini araştırmak için çok sayıda deneysel ve hesaba dayanan çalışmalar gerçekleştirildi ve bu çalışmaların çoğu, bir HCCI motoru için uygun yakıt katkı maddesinin belirlenmesinde önemli bir referans noktası olarak kullanılabilir.

HCCI yanma ve motor performansı üzerine yakıtların etkisini incelemek için çok sayıda araştırma yapıldı. Tam karışımli benzinin (Aroonsrisopon vd., 2002b) ve diesel yakıtının kullanıldığı deneylere ilave olarak n-heptan ve izooktan ana referans yakıtlarının (PRF) kullanıldığı pek çok deney yapıldı (Christensen vd., 1998a; Richter vd., 2000; Olsson vd., 2001b; Eng vd., 2002a). PRF yakıtları, benzin ve diesel yakıtına kıyasla daha basit bir yapıda olduğu ve PRF yakıtlarının kimyasal kinetik mekanizmalarının (kimyasal reaksiyon hız

mekanizmalarının) ayrıntılı olarak bilinmesinden ötürü HCCI yanmanın numerik simülasyonları, deney sonuçlarıyla kıyaslanabildiği için PRF yakıtlarının kullanıldığı deneyler özellikle caziptir. Bu PRF yakıtlı deneyler, HCCI yanmadaki kimyasal kinetiklerin derinliğine araştırılmasında ve yakıt oktan sayısının HCCI yanma üzerindeki etkisinin incelenmesinde çok faydalı olmaktadır. Bununla birlikte n-heptan ve izooktan alternatif yakıt olarak kabul edilmemektedirler. Enerji dairesi (The Department of Energy) genellikle aşağıdaki yakıtları alternatif olarak saymaktadır: sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), metanol, etanol, bio-diesel ve hidrojen (Stravinoha vd., 2000).

4.1.1 Potansiyel Alternatif Yakıtlar ve Yakıt Katkı Maddeleri

Petrol rezervlerinin sınırlı olduğunun farkına varıldığı ilk zamanlardan beri benzin ve diesel yakıtının ekonomik alternatifleri için araştırmalar devam etmektedir. Her ne kadar petrol kökenli yakıtların alternatifleri geliştirildi ise de bu alternatif yakıtların pazardaki geniş çaplı kullanımı, yüksek üretim maliyetleri ve yüksek dağıtım maliyetleri gibi ekonomik faktörlerle sınırlanmaktadır (Owen vd., 1995). Alternatif yakıtların kullanılmasıyla elde edilen taşıt performansları ancak marjinal (sınır) değerlerde olabildiği için bu alternatif yakıtların taşıtlarda kullanılıp kullanılmayacağını genellikle ekonomik faktörler tayin eder. Her ne kadar devlet sübvansiyonları genelde fiyat farklarını azaltmak ve alternatif yakıtların tüketimini teşvik etmek için kullanılsa da alternatif yakıtların perakende fiyatı, ham petrol fiyatındaki dalgalanmalara karşı son derece hassastır. HCCI yanma prosesinin gelişi ve bu yanma prosesinin sahip olduğu yüksek yakıt ekonomisi ve düşük emisyon potansiyeli, alternatif yakıtlara karşı derin bir ilgi uyandırdı. Buradaki beklenti alternatif yakıtların HCCI motorunun gelişimindeki problemlerin bir çoğuna çözüm olması yönündedir.

SI motorlarda en yaygın kullanılan alternatif yakıtlar doğal gaz ve LPG' dir. Bu alternatif yakıtlar Rusya da, Arjantin de, İtalya da, Japonya da, Çin de, Kanada da, Yeni Zelanda da, Avustralya da ve Amerika Birleşik Devletlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Owen vd., 1995). Doğal gazın taşıtlardaki en yaygın kullanılma şekli enerji yoğunluğunun arttırılabilmesi için sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) formudur. Hem LPG hem de CNG taksilerde ve halk taşımacılığında (otobüslerde) yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda sağlanan yakıt tasarrufları, taşıt üzerine depolamanın ve sıkıştırma sistemlerinin yüksek maliyetini karşılamak için yeterlidir. Alkollerin uzun yıllardan beri benzin katkı maddesi olarak kullanılması ve 1970' lerde ham petrol fiyatındaki artış, alkollerin üretimini büyük ölçüde arttırdı. Metanol ve etanol taşıtlarda kullanılması uygun

olan katkısız alkol yakıtlardır. Bu yakıtların her ikisiyle de başarılı HCCI operasyonu sağlanmaktadır.

Uzun senelerden beri tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıklar diesel yakıtlarının setan sayısını arttırmak için kullanılmaktadır. Tutuşma kabiliyetini arttırıcı katık olarak değerlendirilen katkı maddeleri, hem dimetil eter (DME), dimetoksi metan (DMM), dietil eter (DEE) ve di-tertiary butil peroksit (DTBP) gibi oksijenli bileşiklerin hem izopropil nitrat ve izooktil nitrat gibi organik nitratların geniş bir yelpazesini kapsar. Her ne kadar katkısız DME diesel yakıtının yerine bir seçenek olarak düşünülse de DME' nin bugünkü maliyeti diesel yakıtının iki katıdır (He vd., 2000). Bu yüksek maliyetten ötürü DME gerçekte sadece bir yakıt katkı maddesi olarak kullanılabilir. HCCI yanmasına ilişkin literatürde kolayca elde edilebilir yakıt katkı maddesi olarak sadece DME belirtilmektedir.

HCCI operasyonunda yanma ve performans üzerine alternatif yakıtların ve yakıt katkı maddelerinin etkileri bu bölümde tartışılacaktır. Alternatif yakıtların depolanma problemleri ve zehirleyicilik sorunları literatürde geniş surette ele alınmaktadır ve bu bölümde bu konulara değinilmeyecektir (Owen vd., 1995). Bu bölüm, HCCI motorlarda alternatif yakıtların performansı üzerine odaklanacaktır ve deneysel sonuçların anlaşılabilmesi için gerekli olan ilgili yanma kimyasını irdelenecektir. Öncelikli olarak katkısız formda kullanılabilen alternatif yakıtlar irdelenecektir ve bunun akabinde yakıt katkı maddelerinin ve yakıt karışımlarının kullanımı incelenecektir.

4.1.2 Yakıtların Oktan ve Setan Sayıları

Oktan ve setan sayıları motorlarda yakıt performansını belirlemek için kullanılan standart ölçülerden biridir. Alternatif yakıtlardan konu açıldığında her zaman için bu yakıtların oktan ve setan sayılarının bahsi söz konusudur. HCCI yanma, bir buji veya pilot püskürtme kullanılmadan sıkıştırma vasıtasıyla yakıtın kendi kendine tutuşma yeteneğine bağlı olduğu için benzin ve diesel yakıtını karakterize etmek için kullanılan oktan ve setan sayısı testlerinin kısaca tekrar gözden geçirilmesi uygundur.

PRF yakıt karışımlarıyla bağıntılı olan benzin oktan sayısı, benzinin herhangi bir motordaki vuruntu eğilimine işaret eder. n-Heptan ($n-C_7H_{16}$), kolayca kendi kendine tutuşur ve oktan sayısı 0 olarak kabul edilmiştir. Oysa izooktan (2,2,4-trimetil pentan), vuruntuya karşı çok dirençlidir ve oktan sayısı 100 olarak kabul edilmiştir. Tek silindirli CFR (Cooperative Fuels Research) motorunda daha önceden belirlenmiş operasyon koşullarında test edilen yakıtın vuruntu yoğunluğunun tekrar elde edilebilmesini sağlayan izooktan ve n-heptan karışımının bulunmasıyla yakıtın oktan sayısı ölçülür. PRF yakıt karışımındaki izooktan yüzdesi yakıtın

oktan sayısına tekabül eder. Test metodu ASTM D 2700 No' lu motor oktan sayısı (MON) testindeki operasyon koşulları, ağır-yük operasyonunun karakteristiği olan yüksek hız ve yüksek sıcaklık vuruntu koşullarına çok benzemektedir (Chevron, 1996). Test metodu ASTM D 2699 No' lu araştırma oktan sayısı (RON) testindeki operasyon koşulları, kısmi-yükteki düşük hız vuruntu koşullarına çok benzemektedir. RON değeri daima MON değerinden daha büyüktür. RON ve MON değerleri arasındaki fark yakıt hassasiyetinden kaynaklanır (Kalghatgi, 2001). Vuruntu yapmama indeksi (AKI), RON ve MON değerlerinin ortalamasına eşittir: $AKI = (RON + MON) / 2$. Federal Ticaret Komisyonu, dağıtım pompalarının yakıtların AKI değerlerine göre sınıflandırılmasını istemektedir (Chevron, 1996).

Test metodu ASTM D 613 No' lu setan sayısı testi, CFR motorunda diesel yakıtının tutuşabilirliğini karakterize etmek için kullanılır. Bu setan sayısı testi 900 d/dak.' da ki motor hızında gerçekleştirilir. Püskürtmenin başlangıcı üst ölü noktadan önce ki 13°. krank mili açısına sabitlenmiştir ve tutuşma tam ÜÖN' da gerçekleşene kadar sıkıştırma oranı değiştirilir (Chevron, 1998). Böylece setan sayısı testi, 2.4 msn.' lik sabit bir tutuşma gecikmesi süresinde yakıtları sınıflandırır. Test yakıtı için 2.4 msn.' lik tutuşma gecikmesi süresinin sağlandığı sıkıştırma oranında aynı tutuşma gecikmesi süresini sağlayan n-hekzadekan (setan) ve heptametil nonan ana referans yakıtlarının karışım oranı belirlenir. Heptametil nonan, diesel motorunda güçlükle yanar ve setan sayısı 15 olarak kabul edilmiştir. Oysa n-hekzadekan (setan) kolaylıkla tutuşur ve setan sayısı 100 olarak kabul edilmiştir. Yakıt setan sayısı şu denklemle hesaplanır:

$$\text{Setan sayısı} = \% \text{ n-hekzadekan (setan)} + 0.15 (\% \text{ heptametil nonan})$$

Yüksek setan sayıları yüksek tutuşabilirlikli yakıtları simgelerken düşük setan sayıları zayıf tutuşabilirlikli yakıtları simgeler. Şu konunun belirtilmesi önemlidir; setan sayısı testi sabit bir tutuşma gecikmesi süresinde gerçekleştirilir ve yakıt püskürtme hızı (vizkoziteden ötürü) ve yakıt buharlaşması üzerine yakıtın tesiri setan sayısının içinde doğal olarak mevcuttur. Yakıt katkı maddelerinin yakıt püskürtmesinde meydana getirebileceği herhangi değişiklik göz önünde tutulduğunda yakıt katkı maddelerinin setan sayısı üzerine olan kimyasal etkileri dikkatle hesaba katılmak zorundadır.

Herhangi bir yakıtın HCCI yanma karakteristiklerinin direkt olarak yakıt oktan sayısı ile bağıntılı olmadığı birçok defa kanıtlandığı halde (Aroonsrisopon vd., 2002b; Lavy vd., 2001) kendi kendine tutuşmayı elde etmek için hangi mertebedeki sıkıştırma oranlarının gerekli olduğunu belirlemek üzere oktan ve setan sayısı değerlerinden faydalanılmaktadır. Örneğin doğal gaz 122 gibi çok yüksek bir AKI indeksine sahiptir ve bu esasa göre katkısız doğal gazı

kendi kendine tutuşturmak için yüksek sıkıştırma oranlarının gerekli olduğu tahmin edilebilir. Katkısız doğal gaz ile bugüne kadar yapılan HCCI deneylerinin tümü 17:1' den daha yüksek sıkıştırma oranlı diesel motorlarında gerçekleştirildi. Farklı kimyasal kompozisyonlara sahip olan fakat aşağı yukarı denk oktan sayılı çeşitli yakıtlarla yapılan deneyler serisinde kanıtlandığı gibi herhangi bir yakıtın oktan sayısı, HCCI motorundaki kendi kendine tutuşma zamanlamasını tahmin etmek için kullanılamaz (Aroonsrisopon vd., 2002b). Eğer HCCI motorlar binek taşıt kullanımı için başarılı bir şekilde hazır hale getirilirse muhtemelen alternatif test metodlarının, HCCI yanma prosesinde kullanılan yakıtların karakterize edilebilmesi için geliştirilmesi zorunlu olacaktır.

4.2 Katkısız Alternatif Yakıtlar

HCCI motorlarda katkısız formda kullanılabilen alternatif yakıtlar doğal gaz (CNG), LPG, metanol ve etanoldür. Bu yakıtlara ve tipik tek-bileşenli yakıtlara ait ısıl değerler ve performans sayıları Çizelge 4.1' de verilmektedir. Benzin ve diesel yakıtı referans olmaları için Çizelge 4.1' de yer almaktadır. Metan, doğal gazın yapısında en bol bulunan bileşen olduğu için özellikleri Çizelge 4.1' de yer almaktadır. LPG, 3 karbonlu propan ve 4 karbonlu n-bütan hidrokarbonlarının karışımından oluşmaktadır. Bu nedenle her iki hidrokarbon yakıtının özellikleri referans olmaları için Çizelge 4.1' de yer almaktadır. Fischer Tropsch (F-T) diesel, gazdan sıvıya dönüştürme prosesleri kullanılarak üretilen sentetik bir yakıttır ve diesel yakıtının yerine kullanılması düşünülmektedir. Katkısız F-T diesel yakıtının kullanıldığı hiçbir HCCI deneyi literatürde bulunmamaktadır.

Çizelge 4.1' de verilen alternatif yakıtların oktan sayıları yüksektir ve doğal gaz 122 gibi bir AKI indeksiyle en yüksek değere sahiptir. Bu nedenle HCCI deneyleri genellikle sıkıştırma oranları 17:1' den daha büyük olan yüksek sıkıştırma oranlı diesel motorlarında yapılmaktadır. Bununla birlikte alkol yakıtlar daha düşük sıkıştırma oranlarıyla HCCI yanma prosesinde kullanılabilme özelliğine sahiptir. Özellikle metanol, iki stroklu bir motorda 6:1 kadar düşük (Iida vd., 1994) ve dört stroklu bir motorda 11:1 kadar düşük (Oakley vd., 2001) sıkıştırma oranlarında iyi performans gösterdi.

Çizelge 4.1 Katkısız alternatif yakıtlar için yakıt özellikleri

| Yakıt | MON | RON | Setan Sayısı | LHV (MJ/kg) | Kaynaklar |
|---------------|-------|--------|--------------|----------------|--------------------------------|
| Hidrojen | | >130 | | 120 | Tang (2002) |
| Metan | 120 | >127 | | 49.9 | Owen (1995); Kaimai (1999) |
| Propan | 97 | 112 | | 46.3 | Owen (1995) |
| n-Bütan | 89 | 94 | | 45.8 | Leppard (1987) |
| Benzin | 82-89 | 90-100 | 13-17 | 42-44 | Bailey (1997) |
| Diesel Yakıtı | | | 40-60 | ~ 42.5 | Chen (2000) |
| F-T Diesel | | | 74-81 | ~ 42.5 | Gardner (2001); Johnson (2001) |
| Doğal Gaz | 120 | >127 | <6 | 45-49 | Owen (1995); Chen (2000) |
| LPG | 93-96 | 94-110 | <3 | ~ 46 | Watson (2000); Chen (2001) |
| Metanol | 92 | 106 | <5 | 19.9 | Owen (1995); Seko (1998) |
| Etanol | 89 | 107 | <5 | 26.8 | Owen (1995); Bailey (1997) |

4.2.1 Doğal Gaz

Kömürden sonraki en büyük yakıt kaynağı doğal gazdır. Bulunan gaz rezervlerinin yıllık üretimi petrolünkinin iki katıdır (Owen vd., 1995). Her ne kadar doğal gazın kompozisyonu çıkarıldığı kaynağa bağlı olarak değişebilse de genellikle %80 ila %90' ı metandan oluşur. Geri kalan kısmı da etan (C_2H_6), propan (C_3H_8) ve bütan (C_4H_{10}) gibi parafinlerden oluşur. SI motorları doğal gaz kullanımı için kolaylıkla adapte edilebilir. Doğal gazın yüksek oktan sayısı vuruntu problemini azaltır ve daha yüksek termik verim elde etmek için sıkıştırma oranının artırılması mümkündür. Yanmayı başlatmak için diesel yakıtlı pilot püskürtme yapılmadan veya bazı tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıklar kullanılmadan katkısız doğal gazın diesel motorlarda kullanılması mümkün değildir.

Doğal gaz ile HCCI operasyonunun sağlanabileceği anlaşıldı (Christensen vd., 1997; Morimoto vd., 2001). Bununla birlikte doğal gazın yüksek oktan sayısından ötürü yüksek sıkıştırma oranları veya yükseltilmiş emme havası sıcaklıkları ve/veya basınçları gereklidir.

Böylece doğal gazın kendi kendine tutuşması sağlanabilir. Bugüne kadar yapılan deneylerin tümü 15:1' den daha yüksek olan sıkıştırma oranlarında gerçekleştirildi. Doğal gaz kullanan HCCI yanma üzerine sıkıştırma oranının etkileri araştırıldı (Olsson vd., 2002). Sıkıştırma oranı 15:1' den 20:1' e arttırıldığında aynı yanma fazının sürdürülebilmesi (tutuşmanın hep aynı zamanda olabilmesi) için emme havası sıcaklığı 140 °C' den 60 °C' ye azaltılmalıdır. Aşırı doldurmalı HCCI motoruyla yapılan deneylerde görülen şudur; emme manifoldu basıncının 1 bardan 2 bara yükselişiyile optimum yanma fazının sürdürülebilmesi için emme havası sıcaklığının 100 °C kadar azaltılması gereklidir. HCCI motorlarda CNG' ın kullanılabilirliği dahilinde operasyon koşullarının geniş bir yelpazesi bu yapılan deneylerde yer almaktadır.

Doğal gaz kompozisyonunun HCCI yanma üzerine etkileri araştırıldı (Fiveland vd., 2001). HCCI deneyleri sentetik doğal gaz ile gerçekleştirildi. Bu deneylerde kullanılan sentetik doğal gazın kompozisyonu, etanın, propanın ve bütanın farklı miktarlarının metana ilave edilmesi suretiyle değiştirildi. Metana %5 oranında etan veya propan ilave edildiğinde aynı yanma fazının sürdürülebilmesi için emme havası sıcaklığı 20 °C' e kadar azaltılmaktadır. Bu sonuç, büyük parafinlerin metana göre çok daha kolayca düşük sıcaklık reaksiyonlarına maruz kalmasından ve büyük parafinlerin hızlı bir şekilde oluşturduğu radikal karışımın toplam reaksiyon hızını arttırmamasından kaynaklanır. Metanın reaksiyon mekanizmalarının incelenmesinde fayda vardır. Şunu bir defa daha hatırlatmakta yarar var; metanın oksidasyon mekanizması, yüksek sıcaklıklarda metil radikallerinin düşük reaktifliğinden ötürü büyük bir oranı hidrokarbonlardan oluşan yakıtlara ait oksidasyon mekanizmalarının sıra dışı bir örneğidir.

Her ne kadar doğal gazlı HCCI yanma yüksek sıkıştırma oranlarının kullanılmasıyla sağlanabilse de ÜÖN yarık hacimlerinin ve yüksek pik silindir basınçlarının nispeten daha büyük etkisinden dolayı hem HC hem de CO emisyonlarının artması bir dezavantajdır. Yanma verimi, artan sıkıştırma oranıyla lineer olarak düşmektedir (Christensen vd., 1999a). Daha yüksek sıkıştırma oranlarına karşılık gelen daha yüksek pik silindir basınçları aynı zamanda sürtünme kayıplarını arttırdığı için termik verim azalır. Doğal gazlı HCCI operasyonunu sağlamak için daha yüksek sıkıştırma oranlarını veya yükseltilmiş emme havası sıcaklıklarını kullanmak yerine kendi kendine tutuşmayı elde etmek üzere tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden bir katık doğal gaza ilave edilebilir. Doğal gazlı HCCI yanmasına olanak sağlayan katkı maddeleri DME ve F-T diesel' dir. Bu katkı maddelerinin doğal gazın yanması üzerine olan etkileri daha sonra bu bölüm içinde irdelenecektir.

4.2.2 LPG

Ticari LPG' nin ana kaynakları, doğal gaz proseslerinden ve petrol rafinerilerinden ibarettir (Owen vd., 1995). LPG' nin doğal gazdan veya petrolün arıtılmasından elde edilip edilmediğine bakılmaksızın aslında LPG bir yan üründür. Doğal gaz üretimi ve petrol tasfiyesi yapılan ülkelerin pek çoğunda LPG üretimi genellikle talebi aşmaktadır çünkü LPG' nin birim maliyeti ucuzdur. Bununla birlikte LPG' nin depolama ve dağıtım maliyetleri, LPG' nin birim maliyet avantajını kolaylıkla ortadan kaldırmaktadır (He vd., 2000). CNG ve LPG yan ürünlerine yatırılan paranın karşılığını geri alabilmek ve bu yakıtların kullanımının teşviki için Japon ve Çin hükümetleri otobüslerde ve taksilerde CNG veya LPG kullanılmasını istemektedir. Sonuç olarak ağır iş diesel motorlarının yerine geçme potansiyeli olan HCCI motorlarda hem CNG hem de LPG kullanılması için bu ülkelerde büyük bir teşvik vardır.

LPG kompozisyonu dünya genelinde büyük ölçüde değişiklik gösterir. Amerika Birleşik Devletlerinde ve Avrupa da LPG' nin %80 ila %90' ı propandan (C_3H_8) oluşurken Asya ülkelerinde LPG kompozisyonu ekseriyetle bütan (C_4H_{10}) ve bütülen (C_4H_8) içeriklidir (Watson vd., 2000). LPG kompozisyonu kış aylarında dalgalanma gösterir ve C_3 hidrokarbonlarının yüksek miktarlarının ilave edilmesiyle LPG' nin uçuculuğu kontrol edilir. LPG' nin oktan sayısı, LPG kompozisyonuna bağlı olarak 90 ila 100 arasında değerler alır. Klasik SI motorları, minimal motor değişiklikleriyle LPG kullanarak çalışması için kolaylıkla adapte edilebilir. LPG' nin yüksek oktan sayısı, motor kalibrasyonu stratejisi için minimal değişikliklere ihtiyaç olduğunu gösterir. LPG' nin düşük setan sayısından ötürü tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden bir katık kullanılmadan bir diesel motorunun LPG ile çalıştırılması mümkün değildir. Tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katık olarak DTBP' nin (Goto vd., 1999; Alam vd., 2001) ve DME' nin (Kajiwara vd., 2002) kullanılmasıyla diesel motorlarda LPG' nin başarılı uygulamaları sağlandı. Uygun tutuşma karakteristiklerinin elde edilebilmesi için LPG' ye %15 oranında DTBP ilave edilmelidir.

HCCI motorlarda LPG' nin kendi kendine tutuşmasında karşılaşılan problemler yüksek oktan sayısından ötürü CNG kullanıldığında karşılaşılan problemlere benzerdir. Bir HCCI motorunu LPG ile çalıştırmak için yüksek sıkıştırma oranlarından veya yükseltilmiş emme havası sıcaklıklarından birinin kullanılması zorunluluğu vardır. Sonuç olarak HCCI operasyonu literatüründe katkısız LPG' li hiçbir deneysel sonuç yer almamaktadır. Yakıt katkı maddeleri ile LPG' nin beraber kullanıldığı HCCI operasyonuna dair sonuçlar literatürde yer almaktadır. LPG/DME karışımli deneyler 17:1' lik bir sıkıştırma oranında ve 17 °C emme havası sıcaklığında tek silindirli bir motorda yapıldı (Chen vd., 2001). Bu sıkıştırma oranında ve bu

düşük emme havası sıcaklığında katkısız LPG' li HCCI operasyonunun sağlanmasının mümkün olmadığını gördüler. Kendi kendine tutuşma sadece DME' nin LPG' ye ilave edilmesiyle sağlanabildi ve tutuşma fazının ilave edilen DME seviyesine çok duyarlı olduğu görüldü. Kısmi-yük aralığı boyunca ölçülen yakıt verimlilikleri aynı motorda diesel yakıtı ile elde edilen değerlerden %4 ila %5 daha yüksekti. 19:1 sıkıştırma oranlı çok silindri bir motor, propan (LPG bileşeni) ile çalıştırıldı (Flowers vd., 2001). Bu sıkıştırma oranında kendi kendine tutuşmanın sağlanabilmesi için çalışma koşuluna bağlı olarak 110 °C ila 150 °C arasındaki emme havası sıcaklıkları gereklidir. 16:1' lik sıkıştırma oranında ve 800 d/dak.' lık motor hızında bir HCCI motoru hem katkısız bütan (LPG bileşeni) hem de katkısız DME ile çalıştırıldı (Iida vd., 2000). DME sonuçlarının daha detaylı incelemeleri bu bölümün ileri ki kısımlarında mevcuttur.

4.2.3 Metanol ve Etanol

Benzinde oksijenli bileşiklerin kullanılmasına 1920' li yıllarda başlandığı halde ham petrol fiyatlarındaki hızlı artışın bu oksijenli bileşikleri ekonomik olarak uygun hale getirdiği 1970' lerde oksijenli bileşiklerin kullanımı önemli ölçüde yaygınlaştı. Benzine karıştırılan alkoller metanol, etanol, izopropanol ve t-bütül alkoldür. Alkol yakıtların büyük ölçekli üretim ekonomisi yönünden sadece metanol ve etanol katkısız alternatif yakıt olarak uygundur. Dünya geneline dağılmış ve kolayca elde edilebilir kaynaklardan alkollerin üretilmesi ve yenilenebilen enerji kaynaklarından bio-etanol elde edilebilmesi alkol yakıtların avantajlarıdır. Metanol, doğal gaz veya kömürden ve etanol, tarımsal ürünlerin fermantasyonundan elde edilebilir. Bio-etanol CO₂ çevriminde bir net negatiftir ve hiçbir net enerji kazanımı yoktur (Owen vd., 1995). Bio-etanolün petrol türevi yakıtlarla rekabet edebilmesi için devlet sübvansiyonuna çok ihtiyacı vardır.

Hem metanol hem de etanol iyi HCCI yanma karakteristikleri ortaya koymaktadır. Özellikle metanol benzin ile kıyaslandığında HCCI çalışma rejiminin (aralığının) önemli derecede genişlemesini sağlamaktadır. İki stroklu bir SI motorunda yapılan deneylerde metanol, benzinli HCCI operasyonundaki λ değerlerine göre daha büyük hava/yakıt oranı (λ) değerlerini gerçekledi (Diğer bir deyişle HCCI operasyonu daha fakir karışımlarla sağlanabildi) ve rölanti koşullarında HCCI operasyonuna olanak sağladı (Iida vd., 1994). HCCI yanma prosesinde metanol, etanol, PRF 95 ve tam karışimli benzinin performansları kıyaslandı (Oakley vd., 2001). Yakıtların HCCI yanma üzerindeki kimyasal etkilerini açıkça ayırt edebilmek için deneyler 1500 d/dak.' da ki sabit bir motor hızında ve 320 °C' deki sabit emme havası sıcaklığında yapıldı. Kararlı HCCI çalışma rejimini belirlemek için geniş bir

yelpaze çerçevesinde EGR seviyeleri ve hava/yakıt oranları değiştirildi. Hem metanol hem de etanol, benzine veya PRF yakıtına göre denklik oranlarının ve EGR seviyelerinin daha geniş bir aralığında kullanılabilir. Alkol yakıtlar %80' e yaklaşan EGR seviyeleriyle kullanılabilirken benzinin tolere edebildiği en yüksek EGR miktarı %60 idi. Metanol, etanolünkünden de daha geniş olmak üzere tüm yakıtlar arasında en geniş çalışma aralığını sağlayan oldu. Şu da not edilmiştir; metanol, en yüksek EGR seviyelerinde bile ateş almama yapmadı fakat tersine kararlılık sınırlarında gerçekleşen kısmi yanma çevrimlerinin büyük bir oranına sahipti. Metanol ile HCCI operasyonu aynı zamanda direkt püskürtmeli diesel motorlarda sağlandı (Seko vd., 1998). 19:1 sıkıştırma oranlı bir diesel motorda etanol kullanıldığında aşırı doldurmalı HCCI yanmanın etkileri incelendi (Christensen vd., 1998). Emme manifoldu basıncı 1 bardan 2 bara arttırıldığında optimal yanma fazının sürdürülebilmesi için emme havası sıcaklığı 100 °C' den 40 °C' ye azaltıldı.

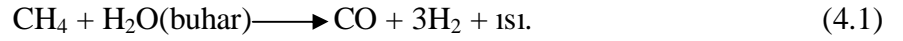
Metanolün ve etanolün tutuşma gecikmesi sürelerini ölçmek için hızlı sıkıştırılmalı makinelerde yapılan deneyler düşük sıcaklık kimyasının herhangi bir kanıtını göstermemektedir (Daeyup vd., 1993). Söylenenin tersine hem dışardan tahrik edilen motorlarla (Li vd., 1995) ve hem de ateşlenmiş motorlarla (Swain vd., 1989) yapılan deneylerde metanol, düşük sıcaklıkta enerji açığa çıkışını sağlamaktadır. Swain, ateşlenmiş motordaki soğuk alev varlığının önceki çevrimin koşullarına kuvvetle tabi olduğunu fark etti ve şu sonuca vardı; metanol/hava ve art gazlar arasındaki etkileşim soğuk alevin oluşmasını sağlamaktadır. Bu sonuçlar şunu ortaya koyar; art gazın, metanolün kendi kendine tutuşmasını kolaylaştıran kimyasal bir etkisi vardır. Tam olarak egzost gazındaki hangi ara ürünlerin tutuşmayı kolaylaştırdığı bilinmemektedir. Alkol yakıtlar, diğer yakıtlara göre daha yüksek seviyelerde formaldehit emisyonları üretir. Metanol, etanole göre daha çok formaldehit üretir (Li vd., 1995). Eğer formaldehit tutuşmanın kolaylaşması için bir hassaslaştırıcı olarak iş görüyorsa o zaman bu durum, niçin metanolün etanole göre daha geniş bir HCCI çalışma aralığına sahip olduğunu açıklayabilir. Alternatif olarak küçük miktarlardaki NO ve NO₂' nin kendi kendine tutuşmayı kolaylaştırabildiği bilinmektedir (Ricklin vd., 2002). Şu da mümkün olabilir; metanol, egzost gazındaki NO_x' in küçük seviyelerine karşı özellikle hassastır. Art gazın, metanolün ve etanolün kendi kendine tutuşması üzerine olan etkilerini anlayabilmek için temel kinetics çalışmasının yapılması gereklidir.

Eğer metanol tek başına HCCI yakıtı olarak kullanılırsa HCCI yanmanın sorunlarına ek olarak alkol yakıtların SI operasyonu ile ilgili bilinen problemlerinin tümü çözülmek zorundadır. Özellikle metanol yakıtlı motorlar ağır yüklerde ön tutuşmaya karşı çok hassas

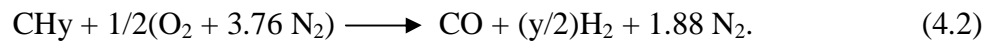
olarak bilinmektedirler (Menrad vd., 1982). Metanolün düşük buhar basıncından ve yüksek buharlaşma ısısı ihtiyacından ötürü 10 °C' nin altındaki ortam sıcaklıklarında metanol yakıtlı SI motorların aynı zamanda ilk hareketi çok zordur. İlk harekete yardım etmesi için taşıt üzerinde metanolden DME (katkı maddesi) üreten sistemlerin nasıl çalıştığı gösterildi (Karpuk vd., 1988).

4.2.4 Hidrojen

Petrol kökenli yakıtlara olan bağımlılığın ve dünya genelindeki CO₂ emisyonlarının azaltılabilmesi amacıyla bir alternatif yakıt olarak hidrojene olan ilgi devam etmektedir. Son zamanlarda hem içten yanmalı motorlarda hem de yakıt hücrelerinde hidrojenin bir taşıt yakıtı olarak kullanılması için artan bir ilgi söz konusudur. Hidrojen birkaç farklı metotla üretilebilir. Hidrojen suyun elektrolizi ile üretilebildiği halde bu proses çok verimsizdir. Hidrojen üretmenin en ekonomik yolu, katalizör eşliğinde buharla doğal gazın tekrar yapılandırılmasından geçer (Mintz vd., 2002). Buharla H₂ oluşturma reaksiyonu şudur:



Hidrojen aynı zamanda herhangi bir hidrokarbon yakıtının hava ile kısmi olarak reaksiyona girmesiyle üretilebilir. Yakıt hücreli taşıt uygulamaları için araç üzerinde taşınan kısmi oksidasyon (PO_x) reaktörleri geliştirilmektedir. Kısmi oksidasyon aşağıdaki genel kimyasal reaksiyon çerçevesinde gerçekleşir.



ki orada y kaynak yakıtın (ana yakıtın) hidrojen/karbon oranı değeridir. Yakıttaki tüm karbonun karbon monoksit'e dönüşebilmesi için gerekli miktardaki havanın tam olarak sağlanması zorunludur.

Hidrojen benzine göre çok daha geniş yanabilirlik limitlerine sahiptir. Yanabilirlik limitleri, dolgu (hava + hidrojen) hacminin %4' ünü hidrojenin oluşturduğu alt yanabilirlik limitinden %75' lik üst yanabilirlik limitine uzanır. Kıyaslama yapıldığında benzinin alt ve üst yanabilirlik limitleri söyleniş sırasıyla %1 ve %7.8' dir (Cracknell vd., 2002). Hidrojen benzine göre 8-10 kat daha yüksek laminar alev hızlarına sahiptir. Hidrojen içten yanmalı

motorlarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Hidrojen yüksek oktan sayısına sahip olduğu halde iyi bilinen ön tutuşma (erken tutuşma) problemlerine sahiptir ki bu problemler, motorun ağır yükteki çıkış gücünü sınırlamaktadır. Piyasaya yeni çıkan bir seri üretim motorunda hidrojen ile yapılan en son deneyler, ön tutuşmanın benzinli operasyon değerlerine göre kısmi yük koşullarında torku %35 oranında ve pik çıkış gücünü %50 oranında azalttığını gösterdi (Tang vd., 2002).

Yanma fazının kontrolü için diğer yakıtlara hidrojen ilavesinin yapıldığı deneyler gerçekleştirilmektedir. Yüksek sıkıştırma oranlı bir diesel motorunda doğal gaza hidrojen ilavesinin yapıldığı deneyler gerçekleştirildi (Olsson vd., 2002). Kütlece %3 (hacimce ~ %20) hidrojen ilavesiyle yanma fazı 8° krank açısı kadar (öne çekilebildi) iyileştirilebildi. Bununla birlikte metanın reaksiyon kimyası, büyük bir oranı parafinik olan yakıtlara ait reaksiyon kimyalarının sıra dışı bir örneğidir. Yakıtların kendi kendine tutuşma zamanlamalarının değiştirilmesindeki hidrojen etkinliği ana yakıtla kuvvetle bağlı olacaktır. Örneğin bir HCCI motorunda PO_x gazı (CO ve H_2) ilavesinin, n-heptanın ve izooktanın yanması üzerine olan etkileri incelendi (Eng vd., 2002). Motor n-heptan ile harici egzost gazı seyreltimli olarak çalıştırıldığında PO_x gazı ilavesi HCCI yanmasını geciktirdi. Motor yüksek sıcaklıktaki silindir içi egzost gazlarıyla seyreltik çalıştırıldığında PO_x gazının, ne n-heptanlı ne de izooktanlı HCCI yanma üzerine hiçbir etkisi yoktu. Büyük bir oranı hidrokarbon olan diğer yakıtlarla yapılan başka deneylerde PO_x gazı ilavesinin, HCCI yanma üzerine herhangi bir etkisi gözlenmedi. Bugüne kadar bir HCCI motorunda katkısız hidrojen ile hiçbir deney yapılmadı. Noda ve Foster, bir HCCI motorunda dolgu sıcaklık dağılımının ana yanma hızları üzerine olan etkilerini araştırırken numerik model çerçevesinde hidrojeni bir model yakıt olarak kullandılar (Noda vd., 2001).

4.3 Yakıt Karışımları ve Katkı Maddeleri

Mevcut katkısız alternatif yakıtlarla ilgili ana problem tümünün metanol ve etanol haricinde yüksek oktan sayılarına sahip olmasıdır. Bu yüksek oktan sayılı yakıtların tümü HCCI operasyonu için yüksek sıkıştırma oranlarını gerekli kılar. Bu yüksek oktan sayılı yakıtların HCCI operasyonu aralığını genişletmek için tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden bir katık yakıtla ilave edilebilir. Yakıt katkı maddelerinin diesel yakıtının tutuşma gecikmesi süresi üzerine olan etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirildi. Diesel yakıtının setan sayısını arttırmak üzere kullanılan yakıt katkı maddelerinin aynıları benzinde veya alternatif yakıtların herhangi birinde de HCCI tutuşmasını kolaylaştırmak için kullanılabilir. Diesel yakıtlı HCCI yanma aksi yönde bir probleme sahiptir çünkü yakıt erken püskürtüldüğünde tutuşma

gereğinden fazla çabuk gerçekleşir ve yanma kötü bir şekilde aşırı gelişmiştir. Bu nedenle diesel yakıtı için arzulanan katkı maddesi tek amaçlıdır. Bu katkı maddesi yakıtın kendi kendine tutuşmasını geciktirerek tutuşma gecikmesi süresini uzatmalıdır.

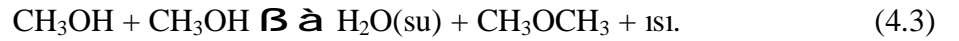
Diesel yakıtına ilave edilen bileşikler geniş bir yelpazededir ve özellikle nitratlı bileşiklerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıkların ve ilk hareket katkı maddelerinin diesel yakıtı üzerine olan etkileri HCCI yanma kapsamında bu bölümde bir daha gözden geçirilecektir. Birçok farklı organik nitrat seneler zarfında değerlendirmeye alındığı halde sadece 2-etilheksil nitrat (2-EHN) genelde piyasada bulunandır (Stein vd., 1999) ve 30 seneyi aşkın bir süredir 2-etilheksil nitrat diesel yakıtına ilave edilmektedir. Eter ve oksinat çeşitlerinin setan sayısı arttırıcı katık olarak iş gördükleri bilinmektedir (Al-Rubaie vd., 1991). Bu bölümde incelenecek olan oksinatlar; dimetil eter (DME), dimetoksi metan (DMM), dietil eter (DEE) ve di-tertiary butil peroksit (DTBP)' tir. Bu katkı maddelerinin kaynama noktaları, alt ısı değerleri ve kimyasal yapıları Çizelge 4.2' de verilmektedir. Her ne kadar HCCI yanma konusunda literatürde sadece DME' den bahsedilse de diğer eterler ve peroksitler ile yapılan deneyler, tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıkların HCCI yanma üzerine olan etkilerinin değerlendirilmesinde olumlu bir katkı sağlar. HCCI operasyonunda Fischer-Tropsch diesel yakıtından ve benzinden oluşan hibrid (melez) yakıt karışımlarının kullanımı aynı zamanda incelenecektir.

Çizelge 4.2 Yakıt katkı maddesi özellikleri

| Kimyasal Madde | Setan Sayısı | Kaynama Noktası (°C) | LHV (MJ/kg) | Kimyasal Formül |
|----------------|--------------|----------------------|-------------|--|
| DME | 55-60 | -25 | 28.8 | CH ₃ – O – CH ₃ |
| DMM | 25-30 | 42 | 22.3 | CH ₃ – O – CH ₂ – O – CH ₃ |
| DEE | >125 | 34 | 33.9 | CH ₃ – CH ₂ – O – CH ₂ – CH ₃ |
| DTBP | | 110 | | $ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{O} - \text{O} - \text{C} - \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 \qquad \text{CH}_3 \end{array} $ |
| 2-EHN | | | | C ₈ H ₁₇ – O – NO ₂ |

4.3.1 DME

Dimetil eterin hem diesel yakıtının yerine katkısız bir yakıt olarak hem de diesel yakıtların tutuşma gecikmesi sürelerinin iyileştirilmesi (kısaltılması) için bir katkı maddesi olarak kullanılması düşünülmektedir (Verbeek vd., 1997). DME aynı zamanda metanol yakıtlı SI motorlarda ilk hareket yardımcısı olarak kullanılmaktadır. DME, katalizör eşliğinde metanolün egzotermik dehidrasyonu ile kolayca üretilir. DME' nin taşıt üzerinde üretildiği sistemler aynı zamanda geliştirildi (Karpuk vd., 1988). Denklik reaksiyonu aşağıdaki yapıdadır.



Denklik dönüşümü, 570 K ila 620 K sıcaklık aralığında %75 ila %85 oranında gerçekleşir. DME aynı zamanda “syngas” dan (H₂, CO ve CO₂ karışımıdır) üretilir. “Syngas”, doğal gazın veya kömürün kısmi oksidasyonundan elde edilmektedir. Katkısız DME' nin taşıma ve depolama maliyetleri dahil tüm yakıt maliyetinin, diesel yakıtınıninkinin %90' ı ila %140' ı arasında olacağı tahmin edilmektedir (Verbeek vd., 1997). Bir diesel motorunda kullanılan

katkısız DME' nin efektif (net) enerji verimi, klasik diesel yakıtınınkinin %55' i ile %70' i arasındadır. Katkısız DME yakıtlı bir diesel motorla ilgili diğer problemler DME' nin yüksek uçuculuk ve düşük yağlılık özelliğine sahip olmasıdır ki bu nedenle, yağlama kabiliyetini arttırıcı türden katıkların yakıt püskürtme sisteminin korunması için ilave edilmesi zorunludur.

DME' nin yukarıda belirtilen yüksek üretim ve dağıtım maliyetlerinden ötürü bugünkü ekonomik koşullarda DME' nin katkısız bir yakıt olarak yaygın kullanımı pek muhtemel gibi gözükmemektedir. DME için daha muhtemel olan diesel yakıtında tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden bir katık olarak kullanılmasıdır. %5 gibi küçük bir oranda yakıt karışımına oksijen ilavesiyle her ne kadar hem CO hem de hidrokarbon HC emisyonları biraz arttı ise de oksijen ilaveli, diesel yakıtlı ve DME' li karışım, partikül maddesinin (PM) önemli derecede azalmasını sağladı (Chapman vd., 2001). PM emisyonlarının azalım seviyesi, çalışma koşullarına bağlıdır ve koşullara bağlı olarak geniş ölçüde değişim gösterebilir.

Katkısız DME çok yüksek bir setan sayısına sahiptir ve bir HCCI motorunda kolaylıkla kullanılabilir. DME yüksek buhar basıncı sayesinde diesel yakıtının erken püskürtülmesiyle ilgili buharlaşma problemlerine maruz kalmaz (Shimazaki vd., 1999). DME' nin diesel yakıtı ile ortak olan tek problemi çok kolay tutuşmasıdır ve yanma fazı kronik olarak aşırı gelişiktir. Tahmin edildiği üzere katkısız DME' li HCCI çalışma rejimi son derece sınırlıdır. Katkısız DME' li HCCI deneyleri yapıldı (Kaimai vd., 1999; Chen vd., 2000; Iida vd., 2000). Deneylerin tümü 800 d/dak.' dan 1200 d/dak.' ya kadar uzanan düşük motor hızlarında 14' den 18' e kadar uzanan sıkıştırma oranlarında gerçekleştirildi. Katkısız DME' nin ısı açığa çıkış profilleri, klasik düşük sıcaklıktaki enerji açığa çıkışının akabinde kısa bir gecikme periyodundan sonra yüksek sıcaklıktaki enerji açığa çıkışını göstermektedir.

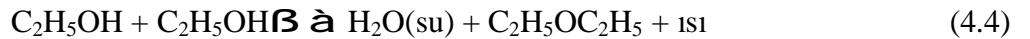
DME' ye LPG' nin (Chen vd., 2001), doğal gazın (Chen vd., 2000) ve H₂ ve CO' dan oluşan "Metanol Türevli Gaz (MRG)" ın ilave edildiği yakıt karışımlarıyla HCCI deneyleri yapıldı. Bu yüksek oktan sayılı (düşük setan sayılı) yakıtların ilavesiyle HCCI çalışma rejimi önemli ölçüde genişletildi. Aslında daha iyi yanma fazının elde edilebilmesi için DME' nin düşük sıcaklık kimyasının engellenip yakıtın kendi kendine tutuşma zamanlamasını geciktirmek üzere yardımcı bir yakıt gereklidir. Yardımcı yakıtın ilave edilmesiyle düşük sıcaklıktaki ısı açığa çıkış zamanlaması geciktirildi ve keza pik ısı açığa çıkış zamanlaması ÜÖN yakınlıklarına kadar geciktirildi. LPG/DME karışımlarıyla yapılan deneylerde şu bulundu; düşük sıcaklıkta enerji açığa çıkışının başladığı sıcaklıklar 580-600 K' dir ve bu sıcaklıklar, ekseriyetle motor yükünden ve motor hızından bağımsızdır (Chen vd., 2001). Bu davranış şekli, düşük

sıcaklıktaki DME oksidasyon mekanizmaları hakkında bilinenlerle örtüşmektedir. Bir dizi denklik oranının eşliğinde CNG/DME karışımlarıyla yapılan deneylerde şu bulundu; tutuşmayı elde etmek için önemli olan parametre DME hava fazlalık katsayısıdır. Toplam hava/yakıt oranı önemli olan parametre değildir (Chen vd., 2000). Sabit hava akışında kendi kendine tutuşmayı elde etmek için DME' nin sadece küçük bir miktarı gereklidir. Sabit hava akışında daha fazla DME ilavesi, tutuşma başlangıcının öne çekilmesinde küçük bir etkiye sahiptir.

4.3.2 DMM ve DEE

Dimetoksi metan (aynı zamanda metilal olarak bilinmektedir) ve dietil eter, partikül emisyonlarını azaltmak için diesel yakıt katkı maddesi olarak kullanılabilirler. Gazdan sıvıya dönüşüm (GTL) teknolojileri kullanılarak doğal gazdan DMM üretilebilir (Vertin vd., 1999). DMM, aynı zamanda DME' nin oksidasyonu yoluyla veya metanolden DME ve DMM' nin kojenerasyonu sayesinde elde edilebilir. Diesel yakıtı/DMM karışımları bir çok defa incelendi (Vertin vd., 1999). Diesel yakıtı/DMM karışımları kullanıldığında ölçülen PM emisyonu azalmaları %30' dan %80' e kadar uzanmaktadır (Cheng vd., 1999; Sirman vd., 2000). Her ne kadar DMM ilavesiyle NO_x ve HC emisyonları değişim göstermese de CO emisyonlarının arttığı bilinmektedir (Cheng vd., 1999). Yakıttaki oksijen yüzdesi ile orantılı olarak PM emisyonlarında lineer bir düşüş gözlenmektedir (Cheng vd., 2002). Bununla birlikte oksijenle zenginleştirilmiş yakıtlar düşük alt ısı değerlere sahip olduğundan ötürü özgül yakıt sarfiyatı artar. DMM, ticari diesel yakıtınınkinden daha düşük bir setan sayısına sahiptir. Diesel yakıtı/DMM karışımlarının setan sayıları düşük çıkmaktadır. Hacimce %30' un altındaki DMM seviyeleri için diesel yakıtı/DMM karışımlarının setan sayısındaki düşüş küçüktür (Vertin vd., 1999).

Dietil eter DME' ye çok benzer çünkü DEE katalizör eşliğinde etanolün dehidrasyonu ile üretilebilir. Dehidrasyon reaksiyonu metanolden DME oluşumunu andırmaktadır.



DEE, diesel motor performansı ve emisyonları üzerine DMM ile aynı derecede benzer etkiler göstermektedir. DEE, diesel motorlar için bir ilk hareket yardımcısı olarak çok etkilidir. Her ne kadar katkısız DEE' nin setan sayısı 100' den büyük ise de DEE' ye diesel yakıt ilavesi tutuşmayı önemli derecede geciktirir (Clothier vd., 1990). Deneysel sonuçlar şunu ortaya

koymaktadır; diesel yakıtındaki aromatik türler, DEE ile etkileşime girerek radikal karışımın oluşmasını geciktirmektedir. %50 / %50 oranındaki DEE (setan sayısı 125) ve etanol (setan sayısı 5) karışımının setan sayısı 19 olarak ölçüldü ki bu değer, yakıtların net setan sayıları düşünüldüğünde beklenen değerden çok düşüktür (Bailey vd., 1997). Diesel ilk hareketi üzerine DEE' nin avantajları şu şekilde açıklanabilir; DEE, katkısız bir yakıt olarak iş görmektedir ve diesel yakıtı buharlaşmasının çok öncesinde tutuşmaktadır.

Diesel yakıtlı HCCI yanmadaki esas problem tutuşmanın çok erken olmasıdır. Diesel yakıtına DMM ve DEE ilavesi kendi kendine tutuşma zamanlamasını ÜÖN yakınlarına kadar geciktirmek için etkili bir yol olabilir. DMM ve DEE' nin düşük kaynama noktalı olması aranan bir özelliktir çünkü bu düşük kaynama noktaları erken püskürtme zamanlamalarıyla beraber yakıtın daha iyi buharlaşmasını sağlamaya yardımcıdır. DMM' li ve DEE' li diesel yakıt karışımlarının HCCI yanma karakteristikleri incelenmedi.

Her ne kadar hem DMM hem de DEE karışımlarıyla diesel yakıtının tutuşma gecikmesi süresi arttırılabilse de bu maddeler, CNG ve LPG gibi hiçbir aromatik tür içermeyen yakıtların kendi kendine tutuşmasını kolaylaştırma yönünde etkili olabilir. CNG' li ve LPG' li HCCI yanma üzerine DMM' nin ve DEE' nin etkisi incelenmedi. Aslında bu tür deneyler caziptir çünkü bu yakıtlar (CNG ve LPG) nispeten daha basit bir yapıya sahiptirler ve bu yakıtların oksidasyonu üzerine detaylı kimyasal kinetik mekanizmalar mevcuttur (Edgar vd.,1997). Detaylı kimya ile beraber hesaba dayanan modellemeler, yakıt etkileşimlerinin HCCI yanma üzerine olan etkilerinin anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

4.3.3 DTBP

Di-tertiary butil peroksit, çeşitli organik peroksit-bazlı tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıkların sadece biridir. Alkil peroksitler, ROOR' tarzında genel bir molekül yapısına sahiptirler. R ve R' parafinik grupları simgeler. Bir setan sayısı arttırıcı katık olarak DTBP' in avantajları 1940' lı yıllardan beri bilinmektedir (Liotta, 1993). Hem tertiary butil hidroperoksit (TBHP) gibi hidroperoksitlerin hem de di-tertiary amil peroksiti (DTAP), tertiary butilcumil peroksiti (BCUP) ve tertiary butilperoksi heksanı (DHBP) kapsayan diğer alkil peroksitlerin, setan sayısı cevabı değerlendirildi (Al-Rubaie vd., 1991). Peroksitlerin tümü setan sayısı arttırıcı katık olarak benzer etkiler sergilerken DTAP ve TBHP bu konudaki en etkin bileşiklerdir.

Peroksitlerin tümü için geçerli olan ana problem ısıl kararlılık konusudur. Bu problem peroksitlerin piyasaya sürülmesine engel olmaktadır. Peroksitler, zaman içinde ortam sıcaklıklarında bozunur ve serbest kökler oluşturur. Bu serbest kökler, hidroperoksitlerin

oluşmasına ve yakıt kullanma problemlerine neden olur. Dialkil peroksitler genel olarak hidroperoksit (ROOH) katkı maddelerinden termal olarak çok daha fazla kararlıdır. DTBP, diesel yakıtı için potansiyeli olan bir setan sayısı arttırıcı katık olarak dialkil peroksitler arasında en çok ilgi çekendir (Liotta, 1993; Nandi vd., 1995). Diesel yakıtının hacimce %1 DTBP ilavesine olan setan sayısı cevabı 10' dan 15' e kadar uzanan setan sayısı artımı yönündedir. Katkı maddelerinin setan sayısı cevabına en fazla etki edenin, yakıtın aromatik içeriği ile ara-distilasyon sıcaklığı (mid-distillation temperature) olduğu belirlendi.

Tutuşturucu katkı maddesi olarak DTBP' nin kullanıldığı direkt püskürtmeli bir diesel motorda LPG ile deneyler yapıldı (Goto vd., 1999; Alam vd., 2001). Hacimce %1 DTBP ilave edildiğinde LPG' nin setan sayısının 48 olacağı ön görüldü. Hacimce %15 DTBP ilave edildiğinde LPG' nin setan sayısının 60 ila 70 arasındaki bir değerde olacağı ön görüldü. Bu çalışmanın amacı diesel yakıtının yerine LPG kullanımının fizibilitesini araştırmak olduğu için motor, geç püskürtme zamanlamaları kullanılarak diesel yanma modunda çalıştırıldı. Motordan alınan performans ve emisyon sonuçları aynı motorda diesel yakıtı ile elde edilenlerle kıyaslanabilir düzeydedir. LPG/DTBP karışımı ve erken püskürtmeli hiçbir HCCI deneyi literatürde bulunmamaktadır.

4.3.4 2-EHN

Organik nitrat bileşiklerin diesel yakıtların setan sayısını arttırmada çok etkili oldukları bilinmektedir. Organik nitratlar RO-NO₂ tarzında genel bir molekül yapısına sahiptirler. Setan sayısı cevabı değerlendirilen bazı organik nitrat bileşikler; izopropil nitrat (IPN), n-butoksietil nitrat (BEN) ve 2-etilheksil nitrat (2-EHN) olarak da bilinen izooktil nitrat (ION)' tır. Nitrat bazlı yakıt katkı maddesi olarak sadece 2-EHN, piyasada bulunan ve diesel yakıtına ilavesi rutinleşmiş olandır. Sonuç olarak diğer potansiyel setan sayısı arttırıcı katıkların etkinliği büyük bir ekseriyetle 2-EHN' nin ki ile mukayese edilir.

Bir ağır iş diesel motorunda 2-EHN' in emisyonlar üzerine olan etkileri incelendi (Schwab vd., 1999). Ayrıca bu çalışmada setan sayısı arttırıcı katık olarak iş gören 2-EHN' nin ve DTBP' nin etkinlikleri kıyaslanmaktadır. Test yakıtının setan sayısı, 7500 ppm 2-EHN ilavesiyle 11.4 kadar arttırılmaktadır. Kıyaslama yapıldığında aynı setan sayısı artışını elde etmek için 12000 ppm DTBP gereklidir. Motor çıktısı emisyonlarındaki değişiklikler direkt olarak yakıtın setan sayısındaki değişikliklere yorulabilir. Setan sayısındaki aynı artış için hem DTBP hem de 2-EHN emisyonlarda aynı değişikliği sağlamaktadır. Her ne kadar bazı deneysel sonuçlar nitratlı katkı vasıtasıyla motora alınan ilave azotun, NO_x emisyonlarını arttırma eğiliminde olduğunu ortaya koysa da bu yapılan deneylerdeki NO_x emisyonları,

2-EHN ilave edildiğinde azalmaktadır. Setan sayısındaki 10' luk bir artış, NO_x emisyonlarını %2 ila %5 civarında, PM emisyonlarını %5 ila %7 civarında ve CO emisyonlarını %6 ila %8 civarında azaltmaktadır.

Bir CFR motorunda çeşitli nitratlı bileşiklerin ve DTBP' nin etkileri değerlendirildi (Li vd., 1986). Bu katkı maddelerinin eşit miktarlarının kullanımıyla test yakıtının setan sayısındaki artışları kıyaslayarak şu sonuca ulaşıldı; DTBP baz alındığında katkı maddelerinin etkinlikleri sırasıyla R_{DTBP}: R_{IPN}: R_{ION}: R_{BEN} = 1.0: 1.09: 1.2: 1.4' tür. DTBP' nin eşit miktar ilavesiyle setan sayısını arttırmadaki etkinliği, 2-EHN' nin sahip olduğu etkinliğin aşağı yukarı %60' ı kadardır. 2-EHN' nin ve diğer nitratların HCCI çalışma koşulları altında kendi kendine tutuşmayı kolaylaştırma üzerine olan etkileri bilinmemektedir. Eğer organik nitratlar HCCI çalışma koşulları altında benzin için tutuşma kabiliyetini artırıcı türden bir katkı olarak etkilirse HCCI çalışma rejiminde organik nitratları yakıtta ilave etmek üzere taşıt üzerinde bir yakıt karışım sisteminin kullanılması mümkün olabilir.

4.3.5 Fischer – Tropsch Diesel

Gazdan sıvıya dönüştürme teknolojileri F-T diesel yakıtı gibi çeşitli yakıtları üretmek için kullanılabilir. F-T diesel, kömür, doğal gaz veya bio-kütle gibi herhangi bir hidrokarbon yakıtından GTL prosesleri kullanılarak sentezlenebilir. Bu prosesler, CO ve H₂' den oluşan "syngas" ın elde edilebilmesi için yakıtın (kömürün, doğal gazın, bio-kütlelerin) kısmi olarak hava ile reaksiyona girmesini gerektirir. Bu prosesten sonra F-T diesel yakıtını elde etmek üzere syngas bir Fischer-Tropsch katalizörü eşliğinde reaksiyona sokulur (Stravinoha vd., 2000). Sasol, F-T diesel üretmek için Güney Afrika da 1955 yılında bir sentetik yakıt üretim tesisi kurdu. Bu ülkede F-T diesel katkısız bir yakıt olarak kullanılmaktadır (Norton vd., 1998). Shell, doğal gazın GTL dönüşümü için kendi ara distilasyon (Middle Distillate Process) proseslerinde farklı bir katalizörün kullanıldığı benzer bir teknolojiyi geliştirdi (Owen vd., 1995). F-T yakıtlarının ve bu yakıtların bir benzeri olan DME' nin, Amerika Birleşik Devletlerinde ve Avrupa da diesel yakıtının yerine kullanılması düşünülmektedir. Şu da bir gerçektir ki petrol rezervleri var olduğu sürece ne DME ne F-T diesel, petrol kökenli yakıtlarla ekonomik olarak rekabet edebilir (He vd., 2000). Bu nedenle bu bölümde hem DME hem de F-T diesel yakıt katkı maddesi olarak telakki edilmektedir. Bugüne kadar katkısız F-T diesel yakıtlı hiçbir HCCI yanma deneyi literatürde belirtilmemiştir.

F-T diesel yakıtının tamamına yakın bir bölümü düz-zincir parafinik moleküllerden oluşur ve F-T diesel, kükürtün, azotun veya aromatiklerin son derece düşük miktarlarını içerir. Bu karakteristikler, F-T diesel yakıtını çok iyi bir alternatif diesel yakıtı yapmaktadır. Uzun

parafinik moleküller, yakıtta yüksek tutuşabilirlik özelliği sağlar ve bu nedenle F-T yakıtları yüksek setan sayılarına (setan sayısı > 70) sahiptirler. F-T yakıtları aynı zamanda petrol kökenli diesel yakıtların setan sayılarını kontrol etmek için rafinerilerde bir karışım maddesi olarak kullanılmaktadır. Motor ayarlarında herhangi bir değişiklik yapılmadan katkısız F-T diesel yakıtı kullanıldığında hem ağır iş diesel motorlarında hem de binek taşıt diesel motorlarında önemli derecede emisyon azalmaları sağlanmaktadır. F-T diesel yakıtının enerji yoğunluğu (alt ısı değeri) normal diesel yakıtınıninkine yakın olduğu için bu tür yakıtların yakıt ekonomisi yönünden hiçbir olumsuzluğu yoktur. 2 No' lu diesel yakıtına %30 oranında F-T ilave edilerek bir ağır iş diesel motorunda yapılan sıcak startlı (başlamalı) kısa süreli testlerde NO_x emisyonlarında %10 azalma, PM emisyonlarında %5 azalma, CO emisyonlarında %15 azalma ve yanmamış HC emisyonlarında %40 azalma sağlandı (Norton vd., 1998). F-T yakıtlara ait problemlerden biri düşük sıcaklıklarda wax (uzun parafinik moleküllerin) oluşmasıdır ve bu nedenle yüksek miktarda F-T ilavesi, soğuk havalarda ilk hareketi problemlile hale getirebilir. Sikloparafinlerin (naftanın) F-T diesel içindeki yüzdesini arttırmak üzere F-T diesel yakıtını, hidrojenle ayrıştırarak (hydrocracking) ve iyileştirerek (upgrading) yukarıdaki problem bir dereceye kadar azaltılabilir. Sikloparafinler çok gelişmiş düşük sıcaklık karakteristiklerine sahiptirler.

Bir ağır iş diesel motorunda F-T nafta ve CNG yakıt karışımları kullanılarak HCCI yanma deneyleri yapıldı (Stanglmaier vd., 2001). Bu motor, doğal gaz ile çalışan bir SI motoruna dönüştürüldü ve 10.75:1' lik bir sıkıştırma oranına sahipti. Emme prosesinde ilave edilen F-T yakıt miktarlarına bağlı olarak yanma fazı etkili bir şekilde kontrol edilebildi. Düşük yüklerde F-T diesel yakıtı çok miktarda kullanıldı ve ağır yüklere doğru birbiri arkasından daha fazla doğal gaz motora verildi. Benzer bir davranış sergileyen DME ve doğal gaz karışımı HCCI operasyonuna bakılarak doğal gazın, F-T yakıtının kendi kendine tutuşmasını frenlediği söylenebilir.

4.3.6 Benzin ve Diesel Yakıt Karışımları

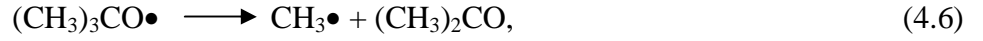
Benzin yüksek oktan sayısı karakteristiğinden ötürü düşük yüklerde HCCI operasyonu için verimsiz bir yakıttır. Diğer taraftan diesel yakıtı ile ilgili olan problem ön karışımı yanma prosesinde diesel yakıtı erken püskürtüldüğünde diesel yakıtının gereğinden fazla çabuk tutuşmasıdır. Benzin ve diesel yakıt karışımı HCCI operasyonu için arzu edilen karakteristiklere potansiyel olarak sahip olabilir. Benzin ve diesel yakıt karışımlarıyla yüksek sıkıştırma oranlı bir diesel motorda kayda değer sonuçlar elde edildi (Christensen vd., 1999a). Benzinin oktan sayısı 98 RON' du ve diesel yakıtının setan sayısı 54' tü. İyi bir yanma fazı

elde etmek üzere deneyler 1000 d/dak.'lık sabit bir motor hızında ve 9.6' dan 22.5' e kadar uzanan sıkıştırma oranlarında gerekli olan emme havası sıcaklıkları kullanılarak yapıldı. 100 °C' deki emme havası sıcaklığında sadece benzin kullanarak HCCI operasyonu elde etmek için sıkıştırma oranı 19:1' e yükseltmek zorundadır. Motor aynı emme havası sıcaklığında diesel yakıtı ile çalıştırıldığında sıkıştırma oranı 11:1' e kadar azaltılabilir. Yine aynı emme havası sıcaklığında %40 benzin / %60 diesel yakıt karışımı kullanıldığında sıkıştırma oranı ancak 12.5:1' e kadar yükseltildi. Belirlenen sıkıştırma oranı ve emme havası sıcaklığında yakıt karışımındaki diesel yakıt miktarı, yanma fazını kontrol etmek için kullanılabilir. Bu deneyler HCCI operasyonu rejiminin genişletilmesi için benzin ve diesel yakıt karışımlarının kullanılabilme potansiyelini göstermektedir. Bununla birlikte deneyler, benzin ve diesel yakıt karışımları kullanıldığında yakıtın kullanılması ve dağıtılması ile ilgili uygulamaya yönelik birçok problemi önlemek için önceden buharlaşmış diesel yakıtı ile yapılmaktadır. Egzost gazındaki atık enerjiyi kullanarak diesel yakıtında bulunan düşük molekül ağırlıklı bileşenleri buharlaştırmak için sistemlerin geliştirilmesi mümkün olabilir. Benzin düşük yağlama özelliğine sahiptir ve eğer benzin, diesel yakıtı ile karıştırılırsa yakıt enjektörü aşınması problemleri doğacaktır.

4.4 Yakıt Katkı Maddelerinin Kimyasal Kinetikleri

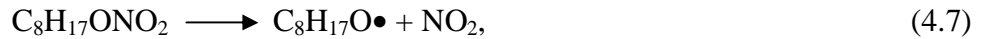
Benzinin veya alternatif yakıtlardan herhangi birinin HCCI operasyonundaki kendi kendine tutuşma karakteristiklerini iyileştirmek için uygun yakıt katkı maddesinin seçiminde tutuşmayı kolaylaştıran katkı maddelerine ait kimyasal reaksiyon mekanizmalarının az da olsa bilinmesi faydalıdır. Bu tür bilgiler, katkı maddesi ve ana yakıt arasındaki herhangi potansiyel kinetik etkileşimi anlamak için özellikle önemlidir çünkü etkileşimler daima beklenildiği gibi gerçekleşmez. Yanma esnasında yakıt zerreciklerinin ve radikallerinin ne şekilde katkı maddesi ile etkileşime gireceği hakkında bir fikir edinmek için ayrıntılı ve özet kimyasal kinetik mekanizmalar faydalı olmaktadır. Tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıkların bazıları için ayrıntılı kimyasal kinetik mekanizmalar geliştirildi. DME için (Curran vd., 1998, 2000)' de, DMM için (Edgar vd., 1997)' de ve DTBP için (Lee vd., 2000)' de ayrıntılı kimyasal kinetik mekanizmalar mevcuttur. Genelde yakıt katkı maddelerinin tutuşma üzerine olan etkileri tam olarak anlaşılmış değildir. Bazı veriler şu sonuca götürmektedir; katkı maddelerinin tutuşmayı kolaylaştırıcı etkisi ekseriyetle ısıl mahiyetlidir ve bu etki, düşük sıcaklıkta katkı maddelerinden enerji açığa çıkmasından ileri gelmektedir. Bununla birlikte diğer araştırmacılar bu etkinin kimyasal mahiyetli olduğunu ileri sürmektedir ve bu etkinin, katkı maddesinin bozunmasıyla oluşan radikallere ait müteakip zincir-dallanma reaksiyonlarından ileri geldiği düşünülmektedir.

Yakıt katkı maddelerinin tümü 650-700 K sıcaklık aralığında hızlı bir şekilde ısıl bozunmaya uğramaktadır. 500 K sıcaklıkta ve atmosfer basıncında DTBP' nin yarı ömrü 10 milisaniyedir ve 700 K sıcaklıktaki yarı ömrü ise 0.1 milisaniyeden daha kısadır (Al-Rubaie vd., 1991). Bu nedenle tipik diesel motor çalışma koşulları altındaki bozunma olayı, yakıtın püskürtülmesine ve buharlaşmasına kıyasla anlık bir durumdur. DTBP' nin ilk (ön) bozunma reaksiyonları şunlardır:



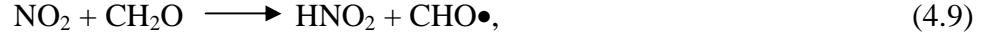
ki orada $(\text{CH}_3)_3\text{CO}\bullet$ kısa ömürlü tertiary butoksi radikalidir. Bu radikal, bir metil radikali ($\text{CH}_3\bullet$) ve aseton ($(\text{CH}_3)_2\text{CO}$) oluşturmak üzere hızlı bir şekilde bozunur. Radikal türler “•” sembolü ile gösterilmektedir. Aseton, tutuşma öncesi sıcaklıklarında çok kararludur ve daha sonraki reaksiyonlara katılmaz. Peroksitlerin tümünde bozunma yoluyla oluşan başlıca radikal türün, metil radikalleri olduğu tahmin edilmektedir.

2-EHN ve diesel yakıt yerine kullanılabilecek özellikteki bir yakıt karışımının, ısıl pirolizi ve oksidasyon kimyası sabit basınçlı bir akış reaktöründe incelendi (Stein vd., 1999). 2-EHN bozunmasının aşağıdaki reaksiyon dizisini izlediği düşüncesi hakimdir.



ki orada $\text{C}_7\text{H}_{15}\bullet$ heptil radikalidir. Heptil radikali, alkilperoksi radikalleri oluşturmak üzere oksijen ilavesine ve iç izomerizasyona maruz kalabilir. Neticede alkilperoksi radikalleri, zincir dallanmasını gerçekleştirir. Clothier' in modelleme çalışması şunu ortaya koyar; 2-EHN' nin diesel yakıtının kendi kendine tutuşmasında kolaylaştırıcı bir etkiye sahip olması

CH₂O ve NO₂ arasındaki etkileşim nedeniyledir (Clothier vd., 1993). Bu çalışma ayrıca aşağıdaki reaksiyonlarla nitrik asit (HNO₂) oluşumunun önemli olduğunu göstermektedir.



Nitrik asit, bir OH• radikali oluşturmak üzere hızlı bir şekilde bozunur.



Bu reaksiyon dizisi, düşük sıkıştırma oranlarında metanol ve art gaz karışımlarının kendi kendine tutuşmasında art gazın gözlenen etkisi için de sorumlu olabilir. Diğer reaktif sistemlerin sorgulanması Clothier ve yardımcılarının şu sonuca ulaşmasını sağladı; katkı maddelerinin kendi kendine tutuşma prosesi üzerine olan tesirliliğini belirleyen unsur, radikal karışımdaki bozunma ürünlere bağlıdır.

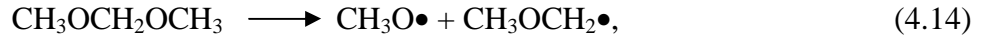
DME için var olan başlangıç reaksiyonu, bir metil radikali ve bir metoksi radikali (CH₃O•) oluşturan bir tek molekülerli bozunmadır (Fischer vd., 2000).



Her ne zaman radikal karışım oluşsa bir metoksi metil radikali (CH₃OCH₂•) oluşturmak üzere CH₃•, H•, ve OH• radikallerinden H atomunun çıkarımı başlangıç reaksiyondur. Yüksek sıcaklıklarda metoksi metil radikali hızlı bir şekilde denklemdeki gibi bozunur.



Düşük sıcaklıklarda metoksi metil radikali, bir oksijenin (O_2) radikale (kendisine) bağlandığı ve akabinde iç izomerizasyon vasıtasıyla bir hidroperoksi metil radikalın ($CH_3OCH_2O_2H\bullet$) olduğu bir davranış tarzı sergileyebilir. Bu hidroperoksi metil radikali, iki formaldehit molekülü ve bir $OH\bullet$ radikali oluşturmak üzere bozunur. DME' nin düşük sıcaklıktaki oksidasyonu, parafinik yakıtlar için var olan klasik reaksiyon davranış tarzlarını izlemektedir. DMM için var olan başlangıç reaksiyonları, DME için var olanlara benzerdir (Vertin vd., 1999).



(4.14) nolu reaksiyonda oluşan metoksi metil radikali, DME oksidasyonu için yukarıda özetlenen benzer reaksiyon mekanizmalarını izler.

Tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıkların tümü için ileri sürülen şudur; bu katkı maddelerinin tutuşmayı kolaylaştırmadaki ana etkinlikleri, bu tür katkı maddelerinin bozunması sırasında açığa çıkan enerjiden ileri gelmektedir (Al-Rubaie vd., 1991). Modelleme çalışması şunu ortaya koymaktadır; metil radikali, formaldehit oluştururken hızlı bir şekilde oksidasyona uğrar ve ısı üretir. Metil radikalının oksidasyonu, radikal karışımın çapını arttırmak için gerekli olan zincir dallanması olmadan gerçekleşmektedir. Bu nedenle katkı maddesi bozunmasının ana etkinliğinin, gaz (dolgu) sıcaklığını lokal olarak arttırmak olduğu düşünülmektedir. Bu yargı, düşük sıcaklık kimyası ve SI kendi kendine tutuşması hususunda diğer araştırmacılar tarafından ulaşılan genel kanı ile aynıdır (Leppard, 1987; Najt, 1987). Kendi kendine tutuşma olayında düşük sıcaklık reaksiyonlarının başlıca katkısı, lokal gaz sıcaklığını arttıran enerjinin açığa çıkmasıyla gerçekleşmektedir. Kendi kendine tutuşma olayında yakıt katkı maddelerinin kimyasal ve ısıl davranış tarzlarını çözmek için daha yapılacak çok iş vardır.

4.5 Gelecekteki Çalışmalar

Bir HCCI motorunda alternatif yakıtları ve yakıt katkı maddelerini kullanmadaki esas maksat HCCI çalışma rejiminin genişletilmesidir. Katkisız alternatif yakıtlardan hem metanol hem de etanol, benzin ve PRF yakıtlarıyla kıyaslandığında hem iki stroklu hem de dört stroklu motorlardaki HCCI çalışma rejiminde bir genişleme sağlamaktadır. Diğer alkol yakıtlarla yapılan deneyler, yukarıda bahsedilen HCCI çalışma rejimindeki genişlemenin alkol yakıtlara ait genel bir özellik olup olmadığını veyahut bu özelliğin sadece metanole ve etanole ait olup

olmadığını anlamak için faydalı olacaktır. Metan ve doğal gaz arasındaki ilişkiye benzer şekilde metanolün çalışma (operasyon) karakteristikleri, alkol yakıtlara ait herhangi bir genel özellikten daha ziyade kendisinin benzersiz yanma kimyasından ileri gelebilir. Art gazın metanolün kendi kendine tutuşması üzerine olan kimyasal kinetik etkilerinin belirlenmesi, yukarıdaki sualleri çözmeye yardım edecektir.

Tutuşmayı kolaylaştıran yakıt katkı maddeleri, düşük yüklerde HCCI operasyonunun sağlanabilmesi için büyük bir potansiyele sahiptir. Diesel motorlarda denenen tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıkların geniş bir yelpazesi var olduğu halde bugüne kadar sadece DME, HCCI yanma hususunda değerlendirilen oldu. HCCI yanma rejiminin genişletilmesi hususunda diğer tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katıkların sistemli bir değerlendirilmesi yapılmalıdır. Özellikle merak edilen konu peroksitlerin benzinli HCCI operasyonunda kendi kendine tutuşma olayını kolaylaştırmadaki etkisidir. Benzinli HCCI operasyonundaki kendi kendine tutuşma prosesi için organik nitratların ve özellikle de 2-EHN' nin tutuşma kabiliyetini arttırıcı türden katık olarak etkili olup olmadıklarını belirlemek üzere deneyler yapılmalıdır. Katkı maddelerinin hem benzin hem de alternatif yakıtlar üzerine olan etkileri incelenmelidir. Yukarıda bahsedilen bu katkı maddeleri birçok yakıtın kendi kendine tutuşmasını kesin olarak iyileştireceği halde bu katkı maddeleri uygulanabilir bir teknoloji opsiyonu haline gelmeden önce çözülmesi zorunlu olan yakıtı kullanmadaki sorunlar ve katkı maddelerinin ısıl kararlılık problemi, hep devam edecektir.

Diesel yakıtlı HCCI yanma hususunda tutuşma kabiliyetini frenleyici türden katıkların (oktan sayısı arttırıcı katıkların) diesel yakıtı üzerine olan etkisi incelenmelidir. Metil tertiary butil eter (MTBE) ilavesinin diesel yakıtı üzerine olan etkilerinin incelendiği başlangıç niteliğindeki bazı deneyler yapıldı (Suzuki vd., 1997b). MTBE' nin ve diğer oktan sayısı arttırıcı eterlerin diesel yakıtlı HCCI yanma üzerine olan etkileri, gerçekten bu katkı maddelerinin kendi kendine tutuşmayı geciktirmede etkili olup olmadıklarını anlamak için incelenmelidir. DEE' nin diesel yakıtının setan sayısını düşürdüğü bilindiği halde DEE' nin HCCI yanmasındaki (operasyonundaki) performansı henüz belirlenemedi.

5. HCCI OPERASYONUNUN KONTROLÜ VE ÇALIŞMA ARALIĞININ GENİŞLETİLMESİ

5.1 Genel Tanımlama

Homojen dolgulu sıkıştırma tutuşmalı (HCCI) yanma, sıkıştırma vasıtasıyla homojen bir karışımın kendi kendine tutuşturulduğu bir prosesten ibarettir. HCCI konusundaki yayınlanmış olan düzenli araştırma sonuçları 1970' li yıllara kadar uzandığı halde homojen dolgulu sıkıştırma tutuşmalı prosesin incelenmesi bu periyodun çok öncesine dayanır. Bugünlerde HCCI araştırmalarına ağırlık verilmesinin nedeni NO_x ve partikül maddesi (PM) emisyonlarının çok düşük değerleriyle birlikte diesel vari termik verim elde edebilme potansiyelinden ötürüdür. Bu nedenle bu tür çalışmalarda sadece çok fakir (veya seyreltik) yakıt-hava karışımlarının göz önünde tutulması gereken olduğu aşikardır. HCCI operasyonlarının motor çalışma çevrimine adaptasyonunun, HCCI operasyonlarının çalışma farklılığından ötürü kendine özgü bir zorluğu vardır. Bununla birlikte temin edilen basınç regülasyonu (aşırı doldurma) vasıtasıyla egzost emisyonlarının ve yakıt sarfiyatının azaltılması hususunda sağlanan yararlar çok büyüktür.

Laboratuar ortamında fakir HCCI operasyonlarını incelemeye alanların hemen hemen tümü başarılı olmasına rağmen bu konsept, çalışma koşullarının geniş bir aralığında hala ticari gerçeklerden oldukça uzaktır. Bu konsepti temiz ve verimli bir taşıt motoru olarak geliştirmeye çalışanların karşılaştığı temel sorunlu konu maksimum termik verim elde etmek için arzulanan doğru zamanlamalı tutuşmanın, ateşleme zamanlaması veya yakıt püskürtme olayı gibi bir unsurla sağlanamamasıdır. Son derece fakir (veya seyreltik) HCCI operasyonlarını tam anlamıyla ifade etmek gerekirse ne buji ateşlemeli (SI) motorlardaki alev yayılımına ne diesel motorlardaki difüzyon karışimli yanmaya benzemeyen bir yanma prosesine sahip oldukları söylenebilir. Bu HCCI ısı açığa çıkış prosesinin başlangıcı, belirgin bir biçimde birçok noktada çok hızlı bir şekilde gerçekleşir. Maksimum termik verim sadece yanma fazı dar bir krank açısı penceresinde gerçekleştiğinde sağlanabilir ki orada ısı kaybı ve genişleme (veya zaman) kaybı minimumdadır.

Krank açısı domeninde pik silindir basıncının yeri, ÜÖN' dan sonraki 8° ila 12° krank açısı derecesi aralığında bulunmaktadır. Yanma süreleri çok kısa olduğu için ideal fazdan sapmalar oldukça büyük (keskin) termik verim azalmasına neden olacaktır. Bu nedenle termik verim yönünden yanma fazının tam kontrolünün sağlanabilmesi çok önemlidir.

HCCI yanma olayını başlatmak için gerekli olan ısı koşullarının kontrolünün, etkili bir biçimde ortaya konması bir sır olarak kalmaktadır. Bu konudaki çalışmaların çoğu, motor çalışma çevriminin karakteristik yapısı içinde yer alan ilk hareketin gerçekleştirilmesini bırakın bir kenara hızdaki ve/veya yükteki ani değişikliklerin üstesinden gelinmesi hususunda çok uzun bir zaman sürecine tabi olan motor dizayn yöntemlerine dayanmaktadır. Bir HCCI motoru tüm ilgili parçalarının ısı denge içinde olduğu durumda bir defa çalıştırıldıktan sonra iyi bir performans gösterir fakat yük değişimi gibi nedenlerden dolayı bu ısı dengedeki küçük bozulmalar, ateş almama veya vuruş gibi önemli problemlere neden olur. HCCI motor gelişimi ile ilgili teknik sorunlar kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Yanmanın başlatılması ve yanma hızı kontrolü
- Dar bir çalışma rejimine sahip olması
- Daha düşük bir güç yoğunluğu elde edilmesi
- Ağır yüklerde çalışma zorluğu
- Özellikle ağır yüklerde ısı açığa çıkışının aşırı hızlı gerçekleşmesinden kaynaklanan yüksek yanma sesi ve olası motor hasarı
- Geçiş operasyonu esnasındaki zorluklar (çalışma modu değişikliği)
- Özellikle düşük yüklerde oluşan aşırı CO ve HC emisyonları
- Ağır yüklerdeki yüksek NO_x emisyonları
- İlk hareket zorluğu

HCCI motor potansiyelinin tam olarak ortaya çıkartılıp çıkartılamaması yukarıdaki teknik problemlerin çözülmesindeki başarı oranına bağlıdır. HCCI prosesinin gerçekleşmesini sağlamak oldukça kolay olduğu halde bu prosesin, çalışma koşullarının geniş bir aralığında ve motor çevriminin uygun anında gerçekleşmesini sağlamak son derece zordur. HCCI yanmasındaki (operasyonundaki) enerji açığa çıkış hızı, sadece yakıtın benzersiz reaksiyon kimyasına değil fakat aynı zamanda emme ve sıkıştırma stroku sırasında karışımın maruz kaldığı ısı koşullara bağlıdır. Sıkıştırma prosesi sırasındaki sıcaklık, basınç ve karışım konsantrasyonunun kompozisyonu ve yakıt-hava-art gaz karışımının benzersiz reaksiyon kinetikleri gibi birçok faktörün tümü, kendi kendine tutuşma prosesine etkide bulunur. Silindir içindeki akış hareketleri sadece karışım oluşumunu değil fakat aynı zamanda ısı transferini etkileyebilir. Tutuşma zamanlaması kontrolünün iyi-ayarlanmış (tanımlanmış) olma ihtiyacı, mühendisleri ve araştırmacıları çeşitli kontrol stratejilerini araştırmaya

yönlendirmektedir. Son beş senede HCCI yanma prosesini kontrol etmek ve motor çalışma aralığını genişletmek üzere birçok farklı yaklaşım ileri sürüldü. Bu yaklaşımların bazıları seri üretim motorlarında daha şimdiden kullanılmaya başlanmıştır. Bu bölüm bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmaları hakkında genel bir bilgi vermektedir. İlk olarak HCCI operasyonunun kontrolü kapsamında motorun çalışma karakteristikleri kısaca bir daha gözden geçirilmektedir ve HCCI yanma prosesine etkiyen kilit niteliğindeki çalışma parametrelerinin bir dizisi tanımlanmaktadır. Müteakip sayfalarda HCCI operasyonunun yanma kontrolü için literatürde geçen ve önem arz eden muhtelif yaklaşımların, geleceğe yönelik uygulamalardaki fizibilitesini değerlendirmek üzere incelemesi yapılmaktadır. Geleceğe yönelik araştırma ve geliştirme hedefleri bu bölümün sonunda verilmektedir. Şunu belirtmekte fayda vardır ki 2, 3, ve 4 No' lu bölümlerde de HCCI operasyonunun kontrolü ve çalışma aralığı sınırlamaları ile ilgili olarak tartışılan konuların bazılarına değinilmektedir. Fakat bu konular daha çok yakıt içeriklidir. Bu bölüm yukarıdaki tartışmalı konuları daha geniş bir temelde ele almaktadır. Bu bölümde ayrıca diğer bölümlerde anlatılan konulara ilaveten başka mevzulara da değinilmektedir.

5.2 HCCI Operasyonunun Kontrolü ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi İçin Önemli Hususlar ve Kilit Parametreler

5.2.1 HCCI Operasyonunun Kontrolü İçin Motor Çalışma Karakteristikleri

HCCI operasyonunu sağlamak için gerekli olan ısı denge koşulu, hızlı ve kısa süreli operasyonlara (hızlı mod değişimlerine) sık sık maruz kalan taşıt uygulamalarında bu teknolojiye büyük zorluklar yüklemektedir. Silindir içindeki ısı koşullarının değişmesine neden olabilen herhangi bir unsur, yanma olayını başlatmak için gerekli olan koşulları etkileyebilir. Kendi kendine tutuşma esnasında eğer dolgunun ısı koşulları ve bileşimi doğru değilse ateş almamayı ve motor vuruntusunu önlemek üzere hiçbir kolayca işe yarar çare yoktur. Motor çalışma koşullarının geniş bir aralığında sağlıklı HCCI yanma kontrolü için önceden sağlanması gerekli olan şey ısı sınır koşullarının doğru bir şekilde kontrol edilmesidir. İyi bilindiği üzere yanma odası boyunca geniş sıcaklık gradyanları mevcuttur ve bu sıcaklık gradyanı aynı zamanda motor çalışma koşullarının önemli bir fonksiyonudur. Çevrimden çevrime ve parçadan parçaya bu sıcaklıklar önemli derecede değişiklik gösterir. Dolgu ve silindir yüzeyleri (piston, silindir cidarı, supaplar, silindir kafası) arasında önemli derecede ısı alış verişi gerçekleşir. Yanma odası yüzey sıcaklıkları, aynı zamanda taşıtın ömrü zarfında yakıt kalıntıları (tortuları) oluştuğunda, döküldüğünde ve tekrar oluştuğunda değişim gösterir. Yakıt kalıntılarının kalınlığı zamandan zamana ve taşıttan taşıta değişiklik gösterir. Ayrıca

kullanılan harici egzost gazı tekrar sirkülasyonunun (EGR' nin) miktarı ve sıcaklığı, emilen dolgunun ısı koşulları, ısıtma bujilerinin kullanımı ve soğutucu ve yağ devrelerindeki akış hızları ve sıcaklıklar kontrol prosesini karmaşık hale getiren tüm parametrelerdir. Tutuşmanın başlangıcı ve yanma hızı ile ilgili olarak silindirler arasındaki farklılıklarda güvenli motor çalışmasını ve verim ve emisyon iyileşmelerini tehlikeye sokabilen sorunlu konulardır. Sıkıştırma oranındaki, EGR dağılımındaki, hava dağılımındaki, her bir silindire püskürtülen yakıt miktarındaki farklılıklar ve soğutma maddesi sıcaklığındaki, silindir kafası ve piston sıcaklıklarındaki dengesizlikler aynı zamanda dikkate alınmak zorundadır.

Hız ve yük değiştiğinde yüksek tekrarlanabilirlikli hızlı mod değişimleri esnasındaki çalışma koşuluna dolgu sıcaklığının doğru şekilde uyum göstermesi zorunlu olduğu için kısa süreli motor çalışmasında gerekli seviyede kontrolün sağlanabilmesi çok daha zordur. Yük ve hız haritası boyunca kararlı HCCI operasyonunu sürdürebilecek ve motorun kısa süreli operasyonlarını (mod değişimlerini) idare eden etkili çareler bulunmalıdır. Kontrol stratejisi, HCCI modunun başlangıcını, HCCI çalışma domenindeki yüke ve hıza bağlı kısa süreli operasyonları ve HCCI operasyonu ve klasik yanma modları arasındaki geçişleri idare edebilmek zorundadır. HCCI operasyonlarının kontrolü için değişken sıkıştırma oranı ve değişken supap zamanlaması gibi çeşitli çarelere ait kısa süreli cevapların, sarsıntısız geçişleri sağlamak üzere dikkatle incelenmesi zorunludur. HCCI operasyonunun kontrolü için kullanılan herhangi bir yaklaşım sonlu (sınırlı) cevap süresine sahip olduğu için motorun çalışma tarzı, çalışma koşullarının ani değişikliklerine karşı dikkatle değerlendirilmeli ve idare edilmelidir. Kontrol stratejisi ile motor çalışma koşullarının uyumsuzluğu, işletilebilirlik ve emisyon problemlerine neden olacaktır ve HCCI operasyonu kazanımlarını maksimize etmek yerine çalışma aralığını daraltacaktır. HCCI operasyonları ve klasik yanma modları arasındaki geçişlere ek olarak motor, aynı zamanda büyük bir sıcaklık değişikliğinin beklendiği durumlarda yakıtı kesme ve yeniden verme proseslerini idare edebilmek zorundadır. Yukarıda anlatılan bütün bu değişkenler, HCCI operasyonun kontrolü için algoritmaların ve stratejilerin tasarlanmasında aşırı büyük zorluklar ortaya koymaktadır.

5.2.2 HCCI Operasyonunun Kontrolü ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi İçin Kilit Nitelikteki Çalışma Parametreleri

HCCI operasyonunun yanma başlangıcı ve ısı açığa çıkış hızları, yakıt-hava-art gaz karışımının kendi kendine tutuşma kimyasıyla ilişkilidir. Yanma fazı öyle önemlidir ki ne erken kendi kendine tutuşma ne geç kendi kendine tutuşma sistem optimizasyonu açısından istenmeyen bir durumdur. Yakıt-hava karışımının kendi kendine tutuşması, karışımın özellikleriyle (karışımın reaktifliğiyle) ve karışım sıcaklığının zaman içinde maruz kaldığı

evrelerle domine edilir. HCCI yanma fazını ve ısı açığa çıkış hızını etkileyen kilit parametreler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Dolgunun kendi kendine tutuşma özellikleri
 - Yakıt tiplerine
 - Yakıt konsantrasyonuna (erken, geç veya bölünmüş püskürtmeler neticesinde)
 - İki veya daha fazla yakıtın karışımına
 - Yakıt katkı maddelerine
 - Yakıtın ön hazırlığına
 - Art gaz (ve/veya EGR) oranına ve art gazın reaktifliğine
 - Su püskürtülmesine
 - Basınç artışına (aşırı doldurma yoluyla)
 - Yanma odası yüzeyinin katalitik özellikte kaplı olmasına bağlıdır.
- Dolgu sıcaklığının oluşumu
 - Emme koşullarına (sıcaklık ve basınç değerlerine)
 - EGR ve/veya art gaz miktarına
 - Isıtma bujisine
 - Isı değiştiricisine
 - Termik bariyere
 - Basınç artışına (aşırı doldurma yoluyla)
 - Silindir içi yakıt püskürtme zamanlamasına
 - Su püskürtülmesine
 - Sıkıştırma oranına
 - Yakıtın buharlaşma gizli ısısına
 - Motorun soğutma maddesi sıcaklığına
 - Dolgu ile motor elemanları arasındaki karşılıklı ısı transferine
 - Motorun hızına ve yüküne bağlıdır.

5.2.2.1 Emme Havası Sıcaklığı

Bir HCCI motorundaki kendi kendine tutuşma zamanlamasına birçok değişken etki eder. Sıcaklık faktörü bu değişkenlerden en etkin olanıdır. Yüksek emme havası sıcaklıkları, erken tutuşma başlangıcını ve yüksek ısı açığa çıkış hızlarını gerçekler. Yüksek emme havası sıcaklıkları, birinci safha tutuşmanın (soğuk alev safhasının) başlangıcını iyileştirir ve ana tutuşma gecikmesi süresini kısaltır. Bahis konusu olan bu sıcaklık faktörü, literatürde geçen HCCI operasyonunun kontrolü ile ilgili olan yaklaşımlar arasında geçmişten beri en kapsamlı şekilde incelenendir. Yüksek emme havası sıcaklıkları HCCI yanmasını geliştirir fakat bu koşullardaki kontrol edilebilir çalışma aralığı nispeten sınırlı kalmaktadır. Eğer kendi kendine tutuşma olayı sıkıştırma stroku sırasında baş gösterecek kadar gelişirse bu durumun termik verimde bir kayba neden olması gerçeğinden ötürü kontrol edilebilir çalışma aralığının haricinde motorun, volumetrik ve termik verimleri büyük ölçüde azalmaktadır. Aynı zamanda motor yükü ve hızı değiştiğinde bu olayları karşılamak üzere dolgu sıcaklığına müdahale edilmezse kendi kendine tutuşma zamanlaması yine değişkenlik gösterecektir. Özellikle çevrim bazında düştüğünde kısa süreli koşullar altında emilen havanın ısıtılmasındaki sınırlılıklardan ötürü bu tür müdahaleler genellikle ağır kalmaktadır.

5.2.2.2 Isı Değiştirici

Egzost gazlarındaki atık ısı enerjisinden faydalanarak emilen havayı ısıtmak üzere ısı değiştiricilerinin kullanıldığı uygulamalar gerçekleştirildi (Martinez-Frias vd., 2000). Ayrıca değişken supap zamanlamasının kullanıldığı bir yaklaşım atık ısı enerjisinden faydalanabilmek için geliştirildi (Yang vd., 2002). Bu dizayn, silindir içerisinde tutulan art gaz miktarını arttırarak dolayısıyla emilen havanın ısıtılmasına olan gerekliliği azaltacak şekilde supap bindirme süresini uzatabilmektedir. Araştırmalarda şu görüldü ki düşük yüklerde egzost gazı ile emme havası sıcaklıkları arasındaki fark emme havasının ısıtılması için yetersiz kalmaktadır. Bu sıcaklık farkını karşılamak için emme havasının kısılması gereklidir. Kısa süreli operasyonlar sırasında motorun kontrol gereksinimlerini karşılamak için emilen havanın silindire giriş sıcaklığının yeterince çabuk ayar edilmesi, ısıtma prosesinin termik ataletinden ötürü ısı değiştiricileri kullanıldığında genelde güçlük sağlanabilir.

5.2.2.3 Sıkıştırma Oranı

Emilen havanın ısıtılmasına bir alternatif teşkil eden sıkıştırma oranı, HCCI yanma kontrolünün sağlanmasında etkili bir çare olarak dikkatle incelendi (Christensen vd., 1999a, 2000). Yüksek sıkıştırma oranı, sıkıştırma stroku sırasında dolgu sıcaklığını arttırabilir ve böylece etkili bir şekilde kendi kendine tutuşma prosesinin başlangıcını geliştirir. Doğal emişli benzinli bir HCCI motorunda yüksek sıkıştırma oranı, düşük optimum emme havası sıcaklığını ve bunun neticesinde yüksek çıkış gücü için gereken yüksek emme havası yoğunluğunu sağladı (Hiraya vd., 2002a). Ayrıca yüksek sıkıştırma oranı, yüksek termik verim sağlar. Bununla birlikte yüksek sıkıştırma oranlı bir HCCI motoru düşük oktan sayılı yakıtlarla çalıştırıldığında ağır yüklerde vuruntu problemi ile karşılaşır. Değişken sıkıştırma oranı bu probleme potansiyel bir çözüm olacak gibi gözükmemektedir fakat pratik değişken sıkıştırma oranı mekanizmalarının gerçekleşmesi zordur ve henüz hiçbir pratik buluş mevcut değildir. Değişken sıkıştırma oranı mekanizması kullanılsa bile HCCI operasyonu kontrolünün pratik olarak tatbiki için çevrim-çözünümlü cevap gereksinimi ve sıcaklık gradyanları dikkatle incelenmesi zorunlu olan konulardır.

SAAB' in değişken sıkıştırma oranlı prototip motorunun kullanıldığı bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada doğal emişli çok silindirli bir HCCI motoru için emme havası sıcaklığı ve sıkıştırma oranı arasındaki denge unsuru incelendi. Bu çalışmada şu görüldü ki yüksek sıkıştırma oranı, emme havası ısıtmasının yerini tutabilmektedir. Fakat yüksek sıkıştırma oranı kullanmadaki çekince hızlı gerçekleşen genişleme prosesinden ötürü reaksiyon süresinin kısalmasıyla CO emisyonlarının artmasıdır (Haraldsson vd., 2002). Bölüm 2' de Najt ve Eng tarafından işaret edildiği üzere sıkıştırma oranı tercihi (veya optimum sıkıştırma oranı) belirgin değildir. Sıkıştırma oranları, kullanılan yakıt ve aynı zamanda HCCI operasyonunun kontrolü için sistemde kullanılan diğer yaklaşımlara göre incelenen sisteme uygun olmalıdır.

5.2.2.4 Egzost Gazının Tekrar Sirkülasyonunun (EGR) ve Art Gazın Etkileri

Bir HCCI motorunda dolgu sıcaklığını kontrol etmenin en pratik yolu, emme sırasında tekrar sirküle edilen egzost gazlarının yüksek seviyelerinin kullanılmasıyla sağlanır. Şu kesinlikle doğrulanmıştır ki sıcak EGR, aktif radikallerin varlığından daha ziyade ekseriyetle emilen karışımın yüksek sıcaklığı dolayısıyla dört stroklu HCCI motorlardaki yanmayı iyileştirmektedir. EGR' nin ısı etkisine ilave olarak EGR içinde var olan inert gazlar kimyasal reaksiyon hızına olan etkileri dolayısıyla ısı açığa çıkış hızını kontrol etmek için

kullanılabilir. Inert gazların etkisi altındaki kimyasal reaksiyon hızları, kendi kendine tutuşma süresini uzatabilir, ısı açığa çıkış hızını yavaşlatabilir ve böylece pik silindir basıncını azaltabilir. Harici EGR basitliğinden ötürü iyi işler. Fakat harici EGR' nin ısı etkisi, EGR sistemindeki ısı kaybından ve kısa süreli operasyonlardaki cevabının ağır kalmasından ötürü sınırlıdır.

Değişken supap zamanlaması yoluyla silindir içindeki egzost art gazlarının tutulması sayesinde, harici EGR yaklaşımında karşılaşılan sistemle ilgili yukarıdaki sorunların birçoğu önlenebilir (Haraldsson vd., 2002). Bir grup araştırmacı tarafından değişken supap zamanlamaları HCCI yanma prosesinin kontrolü kapsamında incelendi. Motor supap zamanlamasının ayarlanması sonucunda iç art gazların işe yarar miktarının silindir içinde tutulması sağlanabilir ve bu iç art gazların taze dolguyu ısıtması neticesinde sıkıştırma yoluyla ısıtma ihtiyacı azalır. Gerekli art gaz miktarının sağlanması neticesinde HCCI yanmanın, tutuşma gecikmesi süresi ve ısı açığa çıkış hızı ayarlanabilir. Silindir içinde tutulan yanmış gaz olsa bile şu görüldü ki art gazın HCCI operasyonundaki kendi kendine tutuşma üzerine olan ana etkisi termaldir ve dolgu seyreltiminin başlıca etkisi ana yanma üzerine olmaktadır (Zhao vd., 2001). Bu yargı iki stroklu motorlar için kaydedilenden farklıdır (Noguchi vd., 1979). Şunu belirtmekte fayda vardır ki değişken supap zamanlaması egzost gazından tekrar enerji kazandırmak için kullanılabilse bile elde edilebilir enerji miktarının sınırları mevcuttur. Motor, HCCI operasyonundaki yakıt verimi kazanımını maksimize etmek için dolgu seyreltiminin yüksek seviyeleriyle birlikte kelebeksiz (gaz kelebeği tam açık konumda) olarak çalıştırıldığı için sade bir ifadeyle çok düşük yüklerde kendi kendine tutuşmayı sağlamak için egzost gazında yeterli ısı enerjisi olmadığı söylenebilir.

EGR homojenliğinin HCCI yanma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görüldü. HCCI motoru fazlasıyla heterojen olarak dağıtılmış EGR' yi tolere etmeye yatkındır. Benzer EGR oranlarında heterojen EGR, çıkış gücünün arttırılması ve pik silindir basıncının düşürülmesi için faydalı olmaktadır. Taze dolgu ve art gaz arasındaki heterojenlik istenilen bir durumdur çünkü yanma odasının EGR' ce zengin bölgelerindeki sıcaklıklar, tamamıyla homojen silindir dolgusuyla ulaşılan değerlerden daha yüksektir. Yakıt-hava karışımı, EGR' ce zengin bölgelerin sınırlarında nispeten daha kolay kendi kendine tutuşur. Bu yargı şu düşünceyle uyusmaktadır; küçük sıcaklık heterojenlikleri, ısı açığa çıkış hızının azaltılmasında faydalı olabilir. Şu belirtilmelidir ki EGR (art gazın)' nin rolü iki misli büyüktür. EGR' nin ısı etkisine ilave olarak inert gazlar vasıtasıyla gerçekleşen seyreltici etkisinin aynı zamanda dikkatle incelenmesi zorunludur. EGR oranı arttırıldığında (lambda düşer) silindir cidarlarının termal söndürücü etkisinin azalmasından ötürü spesifik HC emisyonları düşer. EGR

kullanımı, oksitlenme katalizini daha etkin hale getirerek aynı zamanda egzost gaz sıcaklığını yükseltir.

EGR (art gazın)' nin doğal emişli benzinli HCCI motorunun çalışma aralığı üzerine olan etkisi araştırıldı (Hiraya vd., 2001). Şu görüldü ki art gazın küçük miktarları ve düşük emme havası sıcaklıkları hava-yakıt oranının kullanılma sahasını (aralığını) daraltmaktadır. Fakat motor çıkış gücü önemli derecede artabilmektedir. Kıyaslama yapıldığında art gazın büyük miktarları ve yüksek emme havası sıcaklıkları kararlı yanma için hava-yakıt oranının kullanılma sahasını genişletmektedir fakat maksimum indike ortalama efektif basınç (IMEP) azalmaktadır. Düşük sıkıştırma oranı ve yüksek motor hızı, yüksek emme havası (dolgu) sıcaklığının sağlanabilmesi için silindir içindeki art gazların büyük bir çoğunluğunun tutulmasını gerektirir ki bu durumda, volumetrik verim düşer ve motorun yük sahası sınırlanır. Sabit emme havası sıcaklığında maksimum yük, EGR oranındaki artışla beraber artar. Bu şu sebepten gerçekleşir; EGR oranındaki artış daha verimli bir yanmaya olanak verecek şekilde tutuşma gecikmesi süresini ve yanma süresini uzatır. Bu durum nispeten daha ağır-yük operasyonlarının sağlanmasını mümkün kılmaktadır. Minimum emme havası sıcaklığında her bir EGR oranı için maksimum yük incelendiğinde yanmanın bozulmasından ötürü EGR oranındaki artışla beraber maksimum yükün düştüğü görüldü ve bu nedenle bu durumu dengelemek için yüksek emme havası sıcaklıkları gereklidir. Sonuç olarak volumetrik verim ve de maksimum yük düşmektedir. Doğal emişli benzinli bir HCCI motorunun yük sahasının, ne harici EGR ne iç art gaz vasıtasıyla oksijen konsantrasyonunu azaltarak genişletilemeyeceği sonucuna varıldı. Bu sonuç bir diesel yakıtlı HCCI motorunda gözlemlenen ile ters düşmektedir ki orada EGR, motor çıkış gücünü arttırmak için kullanılabilir.

Son günlerde değişken supap zamanlaması yaklaşımları, iç art gazların yüksek seviyelerini sağlamadaki esnekliğinden ötürü büyük ilgi görmektedir. Bu koşulu sağlaması için iki metot ileri sürüldü (Law vd., 2002). 1. metot egzost strokunda egzost supaplarının nispeten erken kapatılmasıyla egzost gazlarının (yanma neticesinde oluşan silindir içindeki art gazların) önceden belirlenmiş bir miktarının (ki bu miktar çeşitlenmiş olabilir) silindir içinde tutulmasına dayanmaktadır. Tutulan egzost gazı bundan sonra o egzost strokunun son safhalarında sıkıştırılır. Piston bir sonraki emme strokuna geçtiği anda emme supapları açılır ve taze dolgu silindir içerisine çekilir. Sıkıştırma strokunun son safhasında karışımın basınç ve sıcaklığı yeterince arttığında HCCI operasyonu gerçekleşir. 2. metotta egzost supapları açılır ve egzost gazının tümü egzost strokunun sonunda silindirden dışarı atılır. Piston bir sonraki emme strokuna geçtiği anda hem emme hem de egzost supapları eş zamanlı olarak

açılır ve hem taze dolgu hem de egzost gazı aynı anda silindir içerisine çekilir. Yukarıdaki iki metot kıyaslandığında ısı enerjisi 1. metotta 2. metoda göre çok daha iyi korunmaktadır çünkü 2. metotta egzost gazının, silindirden dışarı atıldığı ve daha sonra emme stroku sırasında geri emildiği periyot zarfında egzost manifoldu çevresinde önemli derecede ısı kaybı gerçekleşmektedir. Ayrıca 2. metotta HCCI operasyonunun başlatılması için gerekli olan egzost gazının miktar olarak tam kontrolünün sağlanabilmesi çok daha zordur. Art gazın daha hızlı ve daha optimal bir şekilde kontrolünün sağlanabilmesi için kamsız supap tahrik sistemleri kullanılabilir. Fakat henüz pratik uygulamalar için güvenilir bir sistem geliştirilemedi.

5.2.2.5 Su Püskürtülmesi

Bölüm 3' de Dec tarafından da incelendiği üzere HCCI operasyonunun kontrolü kapsamında ısı açığa çıkış hızını yavaşlatmanın ve kendi kendine tutuşma zamanlamasını kontrol etmenin bir yolu olarak son günlerde su püskürtmesinin kullanılması araştırılmaktadır. Su püskürtmesinin kullanılmasıyla çeşitli motor çalışma koşullarında tutuşma zamanlaması kontrolünün mümkün olduğu kanıtlandı fakat bu tarz çalıştırılma neticesinde zaten yüksek olan CO ve yanmamış HC emisyonları daha da artmaktadır (Christensen vd., 1999b). HCCI operasyonlarında çok düşük seyir eden NO_x emisyonları, su püskürtmesi uygulandığında daha da azalmaktadır. Yüksek emme havası sıcaklıkları kullanıldığında su püskürtmesi, tutuşma zamanlaması üzerinde daha da büyük bir etkiye sahiptir. Bu büyük etkinin, yüksek emme havası sıcaklıklarında suyun daha uniform dağılmasından ve daha fazla buharlaşmasından ötürü olması muhtemeldir. Suyun atomizasyonu, buharlaşması ve dağılımı sistem optimizasyonu için önemli olan tüm parametrelerdir (Iwashiro vd., 2002).

Diesel yakıtlı HCCI yanma fazını kontrol etmek için su püskürtme prosesinin incelenmesi şunu gösterdi; su püskürtülmesi ısı açığa çıkış hızını önemli derecede azaltabilir (Kaneko vd., 2002). Son derece düşük NO_x emisyonlarına ve dumansız bir yanmaya sahip olan mevcut motor çalışma aralığı, daha ağır yüklere doğru genişletildi. Her ne kadar su püskürtme prosesinin reaksiyon bastırıcı etkisi, erken su püskürtme zamanlamalarıyla artsa da optimal olan bir su püskürtme zamanlaması mevcuttur. Su püskürtme prosesinin reaksiyon bastırıcı etkisini azaltan daha erken su püskürtme zamanlamalarıyla suyun buharlaşması geciktirilir. Arttırılan su püskürtme miktarı ile birlikte yanma üzerindeki bastırıcı etki de arttığı halde aşırı derecede su püskürtülmesi, HC emisyonlarındaki ve indike özgül yakıt sarfiyatındaki (ISFC) artışlarla sonuçlanır. Bu nedenle püskürtülen su miktarı, aşırı derecede gelişmiş yanmanın yeterince bastırılması için gerekli olan minimumla sınırlı olmalıdır.

5.2.2.6 Doldurma Basıncı

Doldurma basıncı uygulaması, motorun IMEP değerinin yükseltilmesinde ve HCCI yanma modu için hava-yakıt oranının kullanılma sahasının genişletilmesinde etkili bir yol olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte doldurma basıncı uygulaması, yüksek silindir basınçlarına neden olur ki bu yüksek basınçlar, doldurma basıncının potansiyel uygulanabilirliğini sınırlayabilir. Aşırı doldurmanın (süperşarjın) HCCI operasyonunda ulaşılabilen IMEP değerini arttırabileceği belirlendi (Christensen vd., 1998a). Yakıt olarak doğal gazın kullanıldığı bu araştırmada ulaşılabilen en yüksek IMEP değeri 14 bardır. Bu değer, motorun maksimum basınç limiti 250 bara ayarlı olduğu durumda 2 barlık doldurma basıncı ve 17:1' lik bir sıkıştırma oranı ile sağlandı. Daha düşük bir sıkıştırma oranı ve daha yüksek doldurma basıncıyla daha da yüksek IMEP değeri elde edilebilir fakat bu durumda termik verim düşecektir. Doldurma basıncındaki ve motor yükündeki artışla HC emisyonları azalır. CO emisyon miktarı, hava-yakıt oranına ve ön ısıtmaya çok bağlıdır. Motor, ısıtılmış emme havası ve zenginlik sınırlarına yakın karışımlarla çalıştırıldığında CO emisyonları ihmal edilebilir bir düzeydedir. Tüm test koşullarında NO_x emisyonları son derece düşüktür.

Turboşarjlı çift-yakıtlı HCCI operasyonu için modifiye edilen 6 silindirli bir kamyon motorunun çalışma karakteristikleri incelendi (Olsson vd., 2001b). Etanol ve n-heptan gibi iki farklı yakıt, tutuşma zamanlamasını kontrol etmek için kullanıldı. Bu araştırmanın amacı, büyük boyutlu bir HCCI motorunun ağır yüklerde nasıl çalıştığını göstermek ve turboşarjlı HCCI operasyonu ile alakalı tipik nitelikteki bazı sıkıntıları irdelemektir. Bu araştırma, turboşarj ve çift yakıt uygulamasıyla 16 bar ortalama efektif basıncına (BMEP) kadar ulaşan ağır yük operasyonlarının ve son derece düşük NO_x emisyonlarının elde edilebilme olasılığını kanıtlamaktadır. Her ne kadar bu sistem büyük potansiyel gösterse de emme havası ön ısıtmasının olmayışı, yanma veriminin bozulduğu düşük yüklerde bir dezavantaj yaratmaktadır. Ağır yüklerde düşük seyir eden egzost sıcaklıkları, turboşarj prosesi için çok az enerji sağlar. Bu nedenle turboşarjlı klasik bir diesel motordakinden daha fazla pompa kaybı (türbin-kompresör grubunda) söz konusudur. Bu yüzden turboşarjer (türbinli doldurucu) dizaynı, yüksek pompa verimi ile ağır yük operasyonunun birlikte sağlanabilmesi için çok önemli bir konudur.

5.2.2.7 Yakıt Püskürtme Stratejileri ve Silindir İçindeki Yakıt Dağılımının Etkisi

Lokal dolgu sıcaklığı ve hava-yakıt oranı, HCCI yanma prosesinin başlangıcının kontrol edilmesinde rol alan kilit nitelikteki değişkenlerdir. Silindir içerisine yakıtın direkt olarak püskürtülmesi, püskürtme zamanlamasının çeşitlenmesi neticesinde lokal yakıt

konsantrasyonunun değiştirilmesi suretiyle HCCI yanma prosesinin kontrol edilmesinde büyük bir potansiyele sahiptir. Karışımın sıcaklığı (lokal dolgu sıcaklıkları), aynı zamanda yakıtın buharlaşmasından ötürü dolgunun soğuması neticesinde değişim gösterebilir. Erken yakıt püskürtme prosesi, yakıtın buharlaşıp hava ile karışarak homojen bir dolgu oluşturmaları için yeterli süreyi sağlar. Sıkıştırma stroku sırasında yanma odasına yapılan geç pilot püskürtme, yanma odasının bazı bölgelerinde lokal yakıt konsantrasyonunu arttırarak HCCI yanma fazını kontrol edebilir. Karışımın zenginleştirilmesi aynı zamanda özgül sıcaklık değerlerini düşürür ve böylece dolgudaki net sıkıştırma ısıtmasının miktarı azalır. Bu nedenle karışımı kendi kendine tutuşma sıcaklığına getirmek için daha fazla sıkıştırma yapılmalıdır fakat bu durumda, kendi kendine tutuşmanın başlangıcı gecikir. İki safhalı püskürtme sayesinde bu iki teknik (erken püskürtme ve geç pilot püskürtme), aynı çevrimde beraber uygulanabilir. Egzost supabının erkenden kapatıldığı ve yakıtın silindirin içine püskürtüldüğü bir kombinasyon vasıtasıyla benzinli HCCI yanma prosesini kontrol etmek üzere bir konsept ileri sürüldü (Willand vd., 1998). Erken kapanan egzost supabı, art gazların önemli bir miktarını silindir içinde tutar ve böylece HCCI yanma prosesini başlatmak için gerekli olan sıcaklığın bir kısmını sağlar. Art gazların ısısından yararlanarak yakıtın buharlaşmasını kolaylaştırmak için emme supabının açılışından çok önce bir DI benzin enjektörü vasıtasıyla yakıt silindir içerisine direkt olarak püskürtülebilir. Böylece homojen bir dolgu elde etmek için yeterince uzun bir karışım oluşturma süresi temin edilebilir.

Egzost supabının erkenden kapatılmasıyla sağlanan egzost gazının tekrar sıkıştırılması periyodu zarfında yapılan yakıt püskürtmesinin, zamanlama ve miktar koşulları araştırıldı (Hiraya vd., 2002b). Kendi kendine tutuşma prosesindeki fakirlik sınırının, egzost gazı tekrar sıkıştırma strokunda yapılan yakıt püskürtmesiyle önemli derecede genişletilebileceği görüldü. Egzost gazı tekrar sıkıştırma strokunda tamamlanan yakıt püskürtme prosesine kıyasla emme stroku sırasında yakıtın bir kısmının püskürtülmesiyle sağlanan kendi kendine tutuşma prosesindeki fakirlik sınırı daha geniştir. Egzost gazı tekrar sıkıştırma periyodu zarfında gerekli olan optimal yakıt miktarı, yükteki artışa bağlı olarak azalmaktadır. Şu açıktır ki çok safhalı direkt yakıt püskürtmesi sayesinde, HCCI yanma prosesinin kontrolü bir dereceye kadar sağlanabilir.

Direkt püskürtme kontrollü olarak yakıtın kademelendirilmesine olanak sağladığından ötürü direkt püskürtme prosesinin, HCCI operasyonu için etkili bir yanma fazı kontrol parametresi olduğu belirtilmektedir (Marriott vd., 2002a, 2002b). Çeşitli emme havası sıcaklıklarında, motor yüklerinde ve motor hızlarında optimal yanma fazının elde edilmesi için yakıtın kademelendirilmesi faydalı olmaktadır. Yakıtın kademelendirilmesi, motorun yük durumuna

bağlı olarak emme havası sıcaklıklarının yaklaşık 20 °C' lik bir diferansiyelinde optimal yanma fazını devam ettirebilir. Sabit bir emme havası sıcaklığında yakıtın kademelendirilmesi sağlanarak optimum yanma fazı, yaklaşık olarak HCCI operasyonunun tüm yük sahasında sürdürülebilir. Yakıtın kademelendirilmesi aynı zamanda sabit bir emme havası sıcaklığının varlığında motorun tüm hız sahasında optimum yanma fazını sürdürmek için kullanılabilir. Bununla birlikte motor hızındaki bu kontrol esnekliği, sadece düşük yük koşullarına kapalıdır. Neticede tek bir kontrol parametresi olarak yakıtın kademelendirilmesi, motorun tüm hız ve yük sahasında optimum tutuşma zamanlamasını sürdürmek için yeterli değildir. Tek safhalı ve çok safhalı püskürtmeler için püskürtmenin başlangıç (SOI) zamanlaması parametreleri (değişkenleri), homojen veya yakıtın kademelendirilmiş olduğu bir dolguyu sağlamanın ve keza dumansız motor operasyonunu sürdürebilmenin bir çaresi olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yakıtın kademelendirilmesi, geç püskürtme koşullarında oluşan duman emisyonları dolayısıyla sınırlı bir seviyede tutulmaktadır. Püskürtme zamanlaması parametreleri ile oluşan dolgu kademeleri arasında kurulan dumansız çalışma sahası dahilindeki ilişki, bir dereceye kadar motor hızından etkilenmemektedir. Sonuç olarak yanma fazının kontrol edilebildiği yük ve emme havası sıcaklık sahasının da motor hızından etkilenmediği söylenebilir. Kademeli dolgulu operasyonların, homojen dolgulu operasyonlar ile karşılaştırması yapıldığında yanma performansının önemli derecede değiştiği görülebilir. Dolgunun kademelendirilmesi, HC emisyonlarının önemli derecede azalmasından ötürü yanma veriminin iyileşmesine neden olur. Sonuç olarak motorun genel termik verimi de iyileşme gösterir. Bununla birlikte yakıtın kademelendirilmesi, denk yüklerdeki homojen dolgulu operasyonlara göre her zaman daha yüksek NO_x emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Genel olarak yakıtın kademelendirilmesi arttırıldıkça daha fazla NO_x emisyonunun oluştuğu söylenebilir. Püskürtme zamanlaması parametreleri ile oluşan dolgu kademeleri arasındaki ilişki, yanma fazının kontrol esnekliğine rağmen NO_x emisyonlarının artmasına neden olur. Bununla birlikte bu NO_x artışının büyüklüğü, yakıt püskürtme prosesini iki bağımsız olarak ayarlanmış püskürtmeye ayırarak önemli derecede azaltılabilir. Genel olarak kademeli dolgulu operasyonlar, homojen dolgulu operasyonlara göre daha kısa sürmektedir. Sonuç olarak kademeli çalışma sahasının genelinde vurutu oluşmamaktadır. Bununla birlikte çok safhalı püskürtmeler, geçerli bir kademeli yanma prosesinin ısı açığa çıkış hızının yavaşlatılmasında ve toplam yük ve hız sahasının arttırılmasında da etkili olmaktadır.

Silindir merkezinde daha zengin yakıt dağılımını oluşturmak suretiyle yakıtın kendi kendine tutuşma prosesinde bir zamanlama farkı meydana getirerek motorun çalışma sahasını

genişletmek için bir strateji geliştirildi (Yoshizawa vd., 2002). Bu stratejide yakıt püskürtme prosesi, birinci püskürtme ve ikinci püskürtme şeklinde iki safhaya ayrılmıştır. Birinci püskürtme, yanma odasının her tarafında fakir ve homojen bir karışım oluşturmak için emme stroku sırasında yapılmaktadır. İkinci püskürtme, silindir merkezi civarlarında zengin bir karışım oluşturmak için sıkıştırma stroku sırasında gerçekleştirilmektedir. İkinci püskürtme zamanlaması, HCCI yanma zamanlamasını tayin eder. Deneysel sonuçlar da iki ayrı kendi kendine tutuşma prosesinin gerçekleştiğini göstermektedir ki bu proseslerde, ilk olarak silindir merkezi civarlarındaki karışımca zengin bölge tutuşur ve bu karışımca zengin bölge, bir tutuşturucu kaynak olarak birinci püskürtme vasıtasıyla hazırlanan çevredeki karışımca fakir bölgeyi tutuşturmak için kullanılmaktadır. Karışımca daha zengin bölgede hava-yakıt oranının dağılımı uniform olmadığı için NO_x emisyonları biraz yüksektir. Bu araştırmada görülen şudur ki bu iki safhalı yanma prosesi kararlı değildir ve ikinci yakıt püskürtme prosesinin çevrimden çevrime gösterdiği yakıt miktarındaki farklılıktan ötürü aralıklı olarak vurutu ve ateş almama olayları gerçekleşir ki bu farklılaşma, tutuşma zamanlamasının değişmesine ve kararsız bir yanmanın gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu durum kararlılık gösteren iki-safhalı yanma prosesini elde edebilmek için tutuşma zamanlamasını kontrol etmenin etkili bir yolunun bulunması gerektiğini ortaya koymaktadır. Önerilerden biri buji kullanılmasıdır. Bu iki safhalı yanma konseptinde buji, basınç ve sıcaklık artışını sağlamak amacıyla silindir merkezindeki zengin karışımın sadece küçük bir miktarını tutuşturmak için kullanılmaktadır ve böylece yakıtın geri kalan kısmı, kendi kendine tutuşma prosesi vasıtasıyla tutuşmaktadır. Oluşan NO_x miktarını azaltmak için silindir merkezindeki zengin karışım miktarı, ortamdaki yakıtın sıkıştırma yoluyla kolayca tutuşmasını sağlayabilen en düşük seviye ile sınırlı olmalıdır. Bununla beraber bu çalışma, ağır yük koşullarında silindir merkezinde karışımca zengin bir bölgenin oluşturulmasıyla vurutunun önlenilme olasılığını ortaya koymaktadır. Karışımca zengin bölge, ortamdaki karışımca fakir bölgenin tutuşturulmasında bir tutuşturucu kaynak olarak iş görür. İki safhalı yanma, bu şekilde yani iki ayrı kendi kendine tutuşma prosesi vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu çalışma tarzı, ağır yüklerde vurutu oluşmadan benzin yakıtlı HCCI motorunda kararlı kendi kendine tutuşma prosesinin elde edilebilme olanağını sağlamaktadır. Bu çalışma tarzı aynı zamanda herhangi bir komplike donanıma gereksinim duyulmadan kısa süreli operasyonlar için tutuşma kontrolünü sağlamanın başka bir yolunu göstermektedir.

Çeşitli yakıt püskürtme stratejileri, diesel yakıtlı HCCI operasyonlarının kontrolü kapsamında araştırılmaktadır. Bu araştırmalarda çok safhalı (bölünmüş) püskürtme stratejileri, emme manifolduna yapılan püskürtmelerle, silindir içerisine çok erken yapılan püskürtmelerle ve

silindir içerisine geç yapılan püskürtmelerle birlikte kullanılmaktadır. Diesel yakıtlı HCCI motorunun ilk gelişim evresinde bir benzin manifold yakıt püskürtme sistemi kullanılarak emme supabının açılmasından önce diesel yakıtı, emme havası içerisine dağıtıldı. Basitliğine rağmen bu yaklaşım, homojen bir yakıt-hava karışımının oluşturulmasında iyi iş görmektedir. Fakat bu yaklaşım, emme havasının ön koşullandırılmasını ve diesel yakıtı için düşük bir yakıt püskürtme basıncında iyi atomize olmuş bir yakıt hüzmesini sağlayabilen bir enjektörün kullanılmasını gerektirir. Ayrıca yağın önemli derecede seyrelmesi ve ağır yük operasyonlarına geçme zorluğu gelişim kapsamında çözülmesi gereken konulardır. Diesel yakıtlı HCCI motoru için başka bir alternatif olarak silindir içine yapılan tek safhalı erken püskürtme prosesi aynı zamanda kapsamlı bir şekilde araştırıldı çünkü bu proses, klasik bir diesel yakıt sistemini kullanabilmektedir. Silindir içine yapılan erken yakıt püskürtme stratejisi kullanılarak yakıt, sıkıştırma strokunun erken safhalarında püskürtülmektedir. Yakıtın buharlaşması, ortamdaki gazlardan ısı çeker ve tüm karışımın sıcaklık kompozisyonunu önemli derecede etkiler. Diesel yakıtının erken püskürtülmesiyle elde edilen deneysel sonuçlar, emisyon azalimleri yönünden iyi netice vermektedir. Bu püskürtme stratejisindeki zorluk, özellikle çok erken püskürtme zamanlamalarında klasik yüksek-basınçlı yakıt püskürtme sistemleri kullanıldığı zaman minimize edilmiş yakıt hüzmesi-silindir cidarı etkileşiminin varlığında homojen bir karışım oluşturulmasıdır. Yakıt hüzmesinin penetrasyonunu (boyunu) azaltan ve iyi atomizasyon sağlayan bir meme şiddetle gereklidir. Bu sebeple birçok farklı meme modeli araştırıldı ve bu modeller, literatürde yer almaktadır. Sistem karmaşıklığı göz önünde tutulduğunda henüz pratik bir yakıt püskürtme sistemi geliştirilemedi. En başarılı yakıt püskürtme stratejisi, geç direkt püskürtmeli HCCI operasyonlarıdır. Bu operasyonlarda yakıt, klasik diesel yanmasındakinden (operasyonundakinden) daha geç püskürtülmektedir. Bu operasyonlarda hızlı karışım oluşumu için yüksek türbülans seviyeleri ve tutuşmayı geciktirmek için EGR' nin yüksek seviyeleri kullanılmaktadır (Kimura vd., 1999a). Bu koşullar, kendi kendine tutuşma prosesinden önce yakıt ile havanın yeterli derecede karışmış olmasına olanak sağlamaktadır. Fakat bu geç direkt püskürtme stratejisi, tutuşma gecikmesi süresi zarfında yakıt hüzmesinin, atomizasyonunu, buharlaşmasını ve karışım oluşturmasını sağlamak için çok hızlı bir karışım oluşturma prosesine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca bu tür operasyonlardaki tutuşma gecikmesi süreleri, geç direkt püskürtme stratejisinin ağır yüklerdeki çalışma kabiliyetini önemli derecede sınırlamaktadır. Erken ve geç püskürtme proseslerinin en iyi özelliklerini bir araya getirebilmek için çok safhalı püskürtme prosesleri de araştırıldı ve bu prosesler, literatürde yer almaktadır. Bu çok safhalı püskürtme proseslerinde erken püskürtme, ön karışımli homojen

bir dolgu oluşturmak ve geç püskürtme, kendi kendine tutuşma prosesinin kontrolünü sağlamak maksadıyla kullanılmaktadır. Her bir püskürtme safhasında püskürtülen yakıt miktarı, kritik parametrelerden biridir. Her bir püskürtme prosesindeki buharlaşma derecesi ve yakıt dağılımı aynı zamanda is ve NO_x emisyonlarını önemli derecede etkilemektedir (Yokota vd., 1997). Farklı yakıt püskürtme safhaları uygulandığında bu safhaların yanma fazı ile uyumlu hale getirilmesi önemlidir. Eğer dolgunun ön karışımli kısmının yanma fazı ciddi şekilde aşırı gelişik ise ağır yüklerde ciddi vuruntu problemleriyle karşılaşılması kaçınılmazdır. Aynı zamanda ön karışımli operasyonlarda diesel yakıtı kullanıldığında HC emisyonları yüksektir ve sonuç olarak yakıt sarfiyatı, düşük yanma verimi ve zamansız yanma fazı nedeniyle olumsuz etkilenmektedir. Bununla beraber yakıt püskürtmeli kontrol stratejisi, yanma (tutuşma) zamanlamasının kontrolünde hızlı cevap potansiyeline sahiptir ve HCCI kontrolü için kısa süreli operasyonlarda uygulanabilmektedir.

Son olarak şunu belirtmekte fayda vardır ki diesel yakıtı gibi ağır yakıtların silindir içine yapılan pilot püskürtmesi (kendi kendine tutuşma prosesinden önce silindir içine yapılan geç zamanlamalı yakıt püskürtmesi) HCCI operasyonlarının kontrolü kapsamında literatürde yer almaktadır (Suzuki vd., 1998; Odaka vd., 1999). Bu strateji, emme havasının ön koşullandırılması üzerine olan bağımlılığı ortadan kaldırmaktadır ve son derece (aşırı) fakir bir karışımla bile HCCI operasyonlarına olanak sağlamaktadır. Artan partikül ve NO_x emisyonları gibi geç zamanlamalı yakıt püskürtmesi ile alakalı herhangi bir olumsuzluk, pilot püskürtme stratejisi için de bir sorun teşkil etmektedir. Pilot püskürtme yoluyla sağlanan yakıt dağılımı, tutuşturucu nokta sayısını sınırlar ve kendi kendine tutuşmalı klasik HCCI operasyonlarından farklı bir tarzda yanma prosesinin gerçekleşmesini sağlar. Bu strateji için aynı zamanda çift yakıtın kullanılabilirdiği bir sistem gerekli olabilir. Pilot yakıt miktarının kontrol edilmesi mecburidir. Ön karışımli yakıt için vurutuyla sınırlanmış bir sıkıştırma oranı ve bir hava-yakıt oranı var olmasına karşın pilot yakıtın, kendi kendine tutuşma prosesinde yüksek sıcaklığa gereksinimi vardır. Ön karışımli yakıtın kendi kendine tutuşma karakteristikleri, motorun çalışma aralığını belirler.

5.2.2.8 Yakıtların, Katkı Maddelerinin ve Yakıt Modifikasyonlarının Etkisi

Yakıt tercihi HCCI motor gelişiminde önemli bir unsurdur. Hem yakıtın uçuculuğu hem de kendi kendine tutuşma karakteristikleri önemli parametrelerdir. Homojen bir dolgunun kolaylıkla oluşturulabilmesi için yakıt yüksek uçuculuk özelliğine sahip olmalıdır (Epping vd., 2002). Kimyasal olarak tek safhada tutuşan yakıtlar, yükteki ve hızdaki değişikliklere karşı daha az duyarlıdır. Bu yakıt kaynaklı özellik, motor çalışma koşullarının geniş bir

aralığı için HCCI kontrol sisteminin sağlaması gereken şartları azaltabilir. Yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığı, yüksek yakıt verimi elde edebilmek için optimal motor sıkıştırma oranının seçilmesi hususunda kritik bir konudur. Düşük yüklerde HCCI operasyonu için tüm gerekli koşulların karşılanmasına ilave olarak yakıt, aynı zamanda ağır yük operasyonlarındaki performans kriterlerini yerine getirmek zorundadır. Örneğin benzinli HCCI operasyonunu gerçekleştirmek için yakıtın kolayca kendi kendine tutuşması gereklidir. Bu yüzden benzin düşük bir oktan sayısına sahip olmalıdır. Yukarıdaki durumun aksine benzin, vuruşta oluşmadan yüksek bir çıkış gücü elde edilebilmesi için ağır yüklerde klasik SI alev yayılımını sağlamak maksadıyla yüksek oktan sayısına sahip olmalıdır. Birbiriyle bağdaşmayan bu farklı özellikteki yakıt gereksinimleri, HCCI motor gelişimini son derece zor bir olay haline getirmektedir. Kesin olarak HCCI uygulamalarına özgü hiçbir yakıtın bulunmadığı söylenebilir. Optimal yakıt tercihi, yanma kontrol stratejilerine ve aynı zamanda çalışma koşullarına tabidir. Şunu söylemek mümkündür; HCCI motorları herhangi bir yakıtla çalıştırılabilir. Fakat bunun için şu ikisinden biri yapılmalıdır. Yakıt, spesifik (özel) bir motor dizaynına veya bunun da ötesinde o motor için spesifik bir çalışma koşuluna uyarlanmalıdır. Diğeri ise motorun, spesifik bir yakıtı uyarlanmasıdır.

Bölüm 4' te Eng tarafından kapsamlı bir şekilde tartışıldığı üzere bazı kimyasal bileşenler, kendi kendine tutuşma prosesindeki ısı açığa çıkış hızını frenleme veya arttırma yönünde iş görür. Bu nedenle HCCI operasyonlarındaki kendi kendine tutuşma prosesleri, yakıtı modifiye ederek kontrol altına alınabilir öyle ki tutuşma kabiliyetini arttırıcı veya frenleyici türden bir katığın ilavesiyle yakıt, kimyasal olarak daha fazla reaktif veya frenleyicidir. Örneğin doğal gazlı bir HCCI motorunda şu görülmüştür; silindir içerisinde tutulan egzost gazı içinde bulunan NO_x ' lerin küçük bir miktarı bile HCCI operasyonlarında önemli bir iş görebilmektedir. Her ne kadar ilave azotlu bileşiklerin egzost gazı kalitesinin bozulması üzerine olan etkilerini değerlendirmeye almak gerekse de kimyasal bir yakıt katkı maddesinin ilavesi suretiyle değişik miktarlarda NO_2 kullanımı, HCCI operasyonlarının kontrolü için bir olanak sağlayabilir (Rickling vd., 2002). CNG ve dimetil eter (DME) arasındaki büyük reaktiflik farkı, HCCI zamanlama kontrolünün geniş bir sahada elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte bir yakıt iyileştirici katık kullanılması durumunda CNG ve DME yakıt karışımlarının sağladığından daha sınırlı bir çalışma sahası söz konusudur (Chen vd., 2000).

DME ve metanol türevli (%67 H_2 + %33 CO) gaz karışımını yakıt olarak kullanan bir HCCI sistemi ileri sürüldü (Shudo vd., 2002). Burada bahsi geçen yakıtların her ikisi de metanol iyileştirici (yapılandırıcı) katık kullanılarak egzost ısısından da faydalanmak koşuluyla taşıt

üzerinde üretilmektedir. Bu sistem sayesinde denklik oranının (yakıt/hava oranının) geniş bir aralığında yüksek termik verim sağlanmaktadır. Metanol türevli gaz, DME yakıtlı HCCI operasyonundaki yüksek sıcaklık reaksiyonları vasıtasıyla ısı açığa çıkışının ikinci safhasının zamanlamasını etkili bir şekilde kontrol eder. Bu durum denklik oranının ve motor yükünün kullanılabilen aralığının genişletilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca metanol türevli gazda bulunan CO ve hidrojenin, ikinci safha ısı açığa çıkışının başlangıcını geciktirmede mutlak bir etkiye sahip olduğu görüldü. Kıyaslama yapıldığında hidrojen, DME yakıtlı HCCI operasyonundaki ısı açığa çıkışını karbon monoksitine göre daha fazla etkilemeye eğilimlidir.

Kendi kendine tutuşma zamanlaması kontrolünü sağlayabilmek için farklı oktan sayılı iki farklı yakıtın karıştırılmasına dayanan bir yaklaşım ileri sürüldü (Furutani vd., 1998). Yüke ve hıza göre değişen her bir çalışma koşuluna karşı bu yakıtların optimal bir karışımının olması gerektiği görüldü. Motor operasyonlarının geniş bir çalışma sahasını elde edebilmek için mümkün olduğunca yüksek oktan sayılı yakıtın ve aynı zamanda mümkün olduğunca düşük oktan sayılı yakıtın kullanılması zaruridir. Karıştırılan yakıtlar arasında daha büyük bir oktan sayısı farkı varken daha geniş bir operasyon sahası elde edilebilmektedir. Bazı yüksek oktan sayılı yakıtlar zayıf olan kendi kendine tutuşma karakteristiklerinden ötürü tutuşmaya bilir (belli bir sıkıştırma oranında yüksek oktan sayılı yakıtın ateş almaması durumu) ve bu durum, klasik SI yanmasındakinden daha yüksek HC emisyonlarıyla sonuçlanır. Hem yakıtın toplam miktarı hem de karışım oranı, motorun tork şartını karşılamak üzere iyi ayarlanmalıdır ve bu konu, pratik uygulama için önem arz eden bir zorluk teşkil etmektedir.

Diesel yakıtlı HCCI motorlarda yüksek sıkıştırma oranı, düşük yüklerdeki kendi kendine tutuşma kabiliyetini arttırmak ve silindir içine yapılan direkt yakıt püskürtmesi, yanma zamanlamasını kontrol etmek için kullanılabilir. Bununla birlikte diesel yakıtının düşük sıcaklık kimyası, sıkıştırma prosesi sırasındaki sıcaklıklar eşik değeri geçer geçmez hızlı bir şekilde kendi kendine tutuşma prosesini gerçeklemeye eğilimlidir öyle ki genellikle aşırı derecede gelişmiş yanma fazı söz konusudur. Bu nedenle ekseriyetle sıkıştırma oranlarının azaltılması gereklidir. Ayrıca diesel yakıtının düşük uçuculuğu ile birlikte ÜÖN' dan çok önce kendi kendine tutuşmaya karşı olan doğal eğilimi, partikülsüz yanma için var olan tüm potansiyelini araştırmak için gerekli olan homojen bir karışım oluşumunun elde edilmesini son derece zor bir hale sokmaktadır. Yükseltilmiş emme havası sıcaklıkları, yüksek seviyede bir buharlaşma olması için son derece önemlidir. Diesel yakıtlı HCCI konseptlerinin çoğu sadece tek bir yakıt sevk sistemine (tek bir enjektöre) ihtiyaç gösterse bile yüksek püskürtme basınçları nedeniyle silindir cidarlarının yakıtla ıslanması kaçınılmazdır. Bu durum artan HC, is ve NO_x emisyonlarının sebebidir. Yetersiz derecede atomize olan yüksek momentumlu

diesel yakıt hüzmeleri dolayısıyla HCCI püskürtme sistemlerinin dizaynı oldukça zordur. Yakıt püskürtme sisteminin, silindir hacminin bir ucundan diğer ucuna kadar her yerde fakir ve homojen bir karışım oluşturması ve aynı zamanda sıvı yakıtı silindir cidarlarından uzak tutması istenilen durumdur. Bununla beraber bu sistemin birçok potansiyel avantajından ötürü diesel yakıtlı HCCI operasyonlarını anlamak ve ticarileşmesi için bazı yaklaşımları geliştirmek üzere son yıllarda büyük çabalar sarf edilmektedir. Benzin yakıtlı HCCI motorlar için var olan problemler diesel yakıtlı HCCI motorlarınınkinin tam tersidir. Benzin diesel yakıtına göre daha uçucu olduğu için benzin ile homojen bir karışım oluşturulması nispeten daha kolaydır. Ağır yüklerdeki motor vuruntusunu önlemek için gerekli olan düşük sıkıştırma oranları ile benzinin yüksek oktan sayısı bir araya gelince düşük yüklerde kendi kendine tutuşma prosesinin gerçekleştirilmesi zorlaşır. Bu yüzden benzin yakıtlı HCCI konseptlerinin hemen hepsi, düşük sıkıştırma oranlarında ve düşük yüklerde kendi kendine tutuşma prosesi için gerekli olan sıcaklıkların elde edilebilmesi amacıyla dolgu ısıtmasını veya EGR/art gazın çok aşırı miktarlarını kullanmaktadır. Dolgu ısıtmasının seviyesi, HCCI operasyonları için minimum yükü ve sıkıştırma oranının eşik değerini genel olarak belirler. Benzinin ve diesel yakıtının belirtilen kendilerine has özellikleri dolayısıyla bu yakıtların karıştırılması, çalışma koşullarının geniş bir aralığında istenilen HCCI operasyonlarını sağlamak için potansiyel bir yakıtı teşkil edebilir. Çift yakıt sisteminin nasıl önüne geçilebileceği konusu, gelişim sürecindeki zorluklardan biridir.

5.2.2.9 Motor Hızı

Kuramsal olarak HCCI yanmanın tutuşma gecikmesi süresi, büyük bir oranda karışım kimyasına bağlıdır ve motor hızından bir dereceye kadar etkilenmez. Bununla birlikte HCCI yanmanın krank açısı derecesi ile tanımlanan tutuşma gecikmesi süresi, motor hızı arttığında artar. Tutuşma ÜÖN' dan önce gerçekleştiğinde sıkıştırma sırasındaki sıcaklık artışı, yüksek motor hızlarındaki nispi (bağıl) tutuşma gecikmesini dengelemektedir. Eğer tutuşma ÜÖN' dan sonra gerçekleşirse yüksek motor hızlarının neden olduğu nispi tutuşma gecikmesi, sıcaklık artışını yavaşlatan genişleme prosesi dolayısıyla daha fazla artar. Optimal yanma fazının sağlanabilmesi için motor hızındaki artışa göre emme havası sıcaklığının arttırılması gibi diğer çareler vasıtasıyla tutuşma gecikmesi süresi dengelenmelidir. Motor hızının artışından ötürü meydana gelen tutuşma gecikmesi süresindeki artışlar teorik olarak tamamen dengelenebilir fakat bu konu gerçekte pratik uygulama sahasının sınırları içinde gerçekleştirilebilir. Motor hızı arttıkça tutuşma gecikmesi süresi giderek artar. Bu durumda HCCI yanmasını başlatmak için yüksek bir emme havası sıcaklığının gerekli olduğu belirtildi

(Hiraya vd., 2001). Sonuç olarak kararlı yanma, yüksek emme havası sıcaklıklarıyla ve maksimum yükteki azalmayla sağlanır. Mevcut zaman çerçevesi zarfında yanmayı başlatmanın işe yarar yolu, üst hız sahasının sınırlandırılmasından geçmektedir. Bu konu ile ilgili olarak 1000 d/dak.' dan 5000 d/dak.' ya kadar uzanan bir hız sahasında başarı sağlanmıştır (Haraldsson vd., 2002).

5.2.3 HCCI Operasyonlarının Kontrol Edilebilmesi İçin İleri Sürülen Diğer Yaklaşımlar

Keza birçok başka yaklaşım, HCCI operasyonlarının etkili ve bağımsız bir şekilde kontrol edilebilmesi veya diğer yaklaşımlarla beraber kullanılabilmesi için ileri sürüldü. Bu araştırılan yaklaşımlar, literatürde yer almaktadır. Bu yaklaşımlar arasında ısıtma bujilerinin kullanımı, HCCI operasyonlarının etkili bir şekilde kontrol altında tutulabilmesini sağlayan pratik yollardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte ısıtma bujilerinin cevap süresi, sınırlı ısıtma kapasitesi ve karmaşık sistem kontrolü gibi meseleleri, özellikle hızlı mod değişim operasyonları sırasındaki HCCI operasyonlarının kontrolü kapsamında pratik uygulamalar için geliştirilmesi gereken bazı konulardır.

Bir ateşleyicinin orifisinden çıkan darbeli alev jetinin kullanımı aynı zamanda HCCI operasyonlarını kontrol etmek maksadıyla incelendi çünkü bu metot, yanabilirlik sınırları dahilindeki fakir karışımların yanma hızını ve tutuşma güvenilirliğini artırma potansiyeline sahiptir. Yanma volumetrik olarak başlatıldığı için bu volumetrik yanma, ana yanma odasındaki yakıtın kendi kendine tutuşması için bir tetikleyici olarak iş görmektedir. Orifisten çıkan darbeli alev jetinin, memeden kesintisiz bir şekilde yayılmadığı ve daha doğrusu ana yanma odasındaki yakıtın kendi kendine tutuşması için daha çok bir tetikleyici olarak iş gördüğü doğrulandı (Murase vd., 2002). Güçlü bir darbeli alev jetinin nasıl oluşturulacağı ve ana yanma odasındaki alev yayılma prosesinin nasıl minimize edilebileceği bu yaklaşımdaki geliştirilmesi gerekli olan konular arasında yer almaktadır.

HCCI yanmanın tutuşma prosesini kontrol etmek üzere aynı zamanda katalitik tutuşmalı bir yaklaşım ileri sürüldü. Bu yaklaşım, normal gaz fazı tutuşma sıcaklığının çok aşağısındaki sıcaklıklarda sıkıştırma stroku esnasında ön yanma odasında gerçekleşen katalitik yüzey oksidasyonunun ve katalizör elemana yakın (bitişik) küçük bir hacimde yanma ürünlerinin ve aktif radikallerin birikiminin ana yanma odasında sağladığı flash tutuşmadan ibarettir. Tutuşma zamanlamasının kontrolü, katalitik çekirdek elemanın uzunluğu (bir nevi rezistans), ön yanma odasının boyu, ön yanma odasının çapı ve katalitik çekirdek elemana sağlanan

elektrik gücü (kuvveti) gibi birçok dizayn ve işletme parametrelerinden etkilenmektedir (Cordon vd., 2002).

5.2.4 Çalışma Aralığının Genişletilmesi ve Çift-Modlu Operasyonlar

HCCI operasyonlarının doğru bir şekilde kontrol edilmesine ilave olarak HCCI çalışma ile ilgili tüm faydaları devam ettirmek koşuluyla operasyon yük sahasının nasıl genişletilebileceği konusu, HCCI motor gelişiminde diğer bir önemli engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Ağır yüklerle doğru yanma hızları giderek aşırılaşır ve pik basınç artış hızları çok büyüktür ve motor gürültüsü kabul edilemez seviyelere ulaşır. Sonuç olarak bugünkü HCCI operasyonları, kısmi-yük çalışma koşullarıyla sınırlıdır. Bu yüzden bu umut verici teknolojinin sağlayabileceği yararlılardan önemli derecede faydalanılamamaktadır. Bu nedenle HCCI motor gelişiminde çalışma aralığının genişletilmesi, kendi kendine tutuşma prosesinin kontrol edilmesi kadar önemlidir. Son üç senedir bu konu ile ilgili olarak birçok çalışma yapılmaktadır. Önceki kısımlarda bahsedildiği üzere HCCI motorunun çalışma aralığını genişletmek için yakıt püskürtme zamanlamasının kontrol edilmesi neticesinde silindir içindeki yakıt dağılımına müdahale edilmesi, EGR/art gaz miktarlarının artırılması, silindir içerisine su püskürtülmesi, yakıtın katkı maddeleriyle iyileştirilmesi ve doldurma basıncı uygulamasının kullanılması gibi çeşitli yeni yaklaşımların tümü araştırılmaktadır ve bu yaklaşımlar, literatürde yer almaktadır. Teknik detaylar için önceki kısımlara tekrar bakabilirsiniz. Şu açıktır ki her bir yaklaşım kendine has özelliklere ve sınırlamalara sahiptir ve çalışma koşullarının geniş bir aralığı için seri üretimine geçilebilecek bir yaklaşım henüz belirlenemedi. Örneğin aşırı doldurma (süperşarj), HCCI çalışma aralığının genişletilmesi için umut verici metotlardan biri olarak en fazla benimsenendir. Bu tür uygulamalarda söz konusu olan motor yapısının tahtidi altında motorun ne kadar aşırı doldurulabildiği ve tolere edilebilir yanma gürültüsünün nereye kadar uzandığıdır.

Yüksek denklik oranına sahip (zengin karışimli) HCCI operasyonları bazı yeni teknikler vasıtasıyla elde edilebilse bile diesel yakıtlı HCCI motoru ağır yüklerde çalıştırıldığında bu tarz operasyonların, NO_x emisyonunu azaltma yönündeki faydası çok küçüktür. Benzin yakıtlı HCCI operasyonlarının SI yanmasına göre olan verim avantajı, ağır yük operasyonlarında azalmaktadır çünkü gaz keleşinin açık konumu SI operasyonlarında daha iyi netice vermektedir. Emisyonlar yönünden bakıldığında benzin yakıtlı bir HCCI motoru, üç işlevli bir katalitik konverter ile donatılan stokiyometrik oranlı bir SI motoru ile kıyaslandığında çok daha az avantaja sahiptir. Bu nedenle HCCI operasyonları için çift modlu operasyon stratejisi en iyisi olacak gibi gözükmektedir. Motor, düşük yüklerde HCCI modunda çalıştırılır ve

HCCI operasyonları klasik yanma modlarıyla karşılaştırıldığında yanma kontrolünün zorlukla sağlandığı ve hem verim hem de emisyonlar yönünden daha kötü sonuçların alındığı yük noktasında klasik yanma modlarından birine geçer. Ayrıca düşük yüklerde SI motorunun gaz keleşbeği son derece kısık olarak tutulduğu için (bu durumda pompalama kayıpları aşırı yüksek) benzin yakıtlı HCCI motorunun düşük yüklerde çalıştırılması, her türlü motor randımanına olanak sağlar. Diesel yakıtlı HCCI motorların düşük yüklerde çalıştırılması, özellikle düşük egzost gazı sıcaklıklarında daha belirgin hale gelen diesel ard işlem sisteminin dezavantajını ortadan kaldırabilir. Diesel yakıtlı HCCI motorların kullanılması, düşük yük koşulunda NO_x ve PM emisyonları için mevcut olan ard işlem gereksinimini ortadan kaldırabilir. Ağır yüklerde klasik diesel yanma moduna geçildiğinde bu ard işlem sistemleri, emisyonların temizlenmesinde etkili olmaktadır. Şu not edilmelidir ki düşük yük HCCI operasyonları, her şeye rağmen HC ve CO emisyonlarını azaltmak için düşük sıcaklıklarda etkili bir şekilde kullanılabilen oksidasyon katalizörlerine ihtiyaç duyar. Hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) emisyonları, HCCI operasyonlarında genellikle oldukça yüksektir.

HCCI operasyonlarının ağır yüklere doğru genişletilmesine ilave olarak HCCI operasyonları aynı zamanda boşta çalışma gibi çok düşük yüklere kapalıdır çünkü bu yüklerde, sıkıştırma strokunun sonuna doğru karışımın kendi kendine tutuşmasını başlatmak için yeterli ısı enerjisi mevcut değildir. Bundan başka boşta yakın yüklerde düşük egzost gaz sıcaklığı neticesinde oluşan aşırı miktardaki CO ve HC emisyonları, bu yanma modunu yanma verimi ve egzost emisyonları yönünden daha az çekiçi bir hale getirmektedir. Benzer olumsuzluklar aynı zamanda HCCI motorunun ilk hareketinde ortaya çıkmaktadır. İlk hareket esnasındaki silindir cidar sıcaklığı çok düşük ve sıkıştırılan taze dolgudan soğuk yanma odası duvarlarına doğru olan ısı kaybı çok yüksek olduğu için HCCI motoru ilk hareket sırasındaki ateşlemede büyük bir zorluk yaşamaktadır. Sonuç olarak motor, klasik (SI veya diesel) yanma modlarından biriyle harekete geçirilmeli ve daha sonra kısa bir ısınma periyodunun ardından HCCI yanma moduna geçmelidir. Bunun için motor işletim sisteminde bir uzlaşma sağlanmalıdır. Herhangi bir etkili teknik keşfedilmedikçe klasik ilk hareket metotlarının uygulanması kaçınılmazdır. İlk hareketin HCCI operasyonlarıyla sağlanması çok daha güç olan durumdur. Şu kesindir ki çok düşük yüklerde güçlü bir yanmanın yakıt verimindeki ve emisyonlardaki tüm HCCI yararları ile birlikte sağlanması, HCCI operasyonlarının ağır yüklere genişletilmesi kadar önemlidir.

Özet olarak şu söylenilebilir; HCCI operasyonlarını tüm yük sahasında gerçekleştirmek için herhangi etkili bir teknik geliştirilmedikçe taşıt uygulamaları için herhangi bir pratik HCCI motoru çoklu modlarla çalışacak şekilde dizayn edilmelidir. Bu motor, çalışma rejiminin

ortasında HCCI operasyonlarını kullanır ve ağır yüklerde ve ilk hareket prosesinin de dahil olduğu düşük yüklerde klasik yanma modlarından birine geçer. Motor işletim sistemi, özellikle hızlı mod değişimleri sırasında çalışma modları arasında kolay bir geçişe olanak verecek biçimde tasarlanmalıdır. Genellikle direkt yakıt püskürtmeli motorlarda mod değişim proseslerinin fizibilitesi daha yüksektir. Nispeten düşük sıkıştırma oranlı motorlarda HCCI yanma modundan SI yanma moduna geçişin fizibilitesi daha yüksektir. Eğer motor, HCCI operasyonlarının yüksek termik verim avantajını kullanmak için yüksek bir sıkıştırma oranına sahipse bu durumda, SI moduna geçişler daha uğraştırıcı bir hal alacaktır. Son olarak şunu belirtmekte fayda vardır ki ağır yük operasyonlarında HCCI modu ile çalışıldığında karşılaşılan problemlerin bazılarını önlemek için çift-modlu operasyonların kullanılması söz konusu olsa bile HCCI mod sahasını genişletmek suretiyle bu yeni yanma teknolojisinin tüm avantajlarını kullanabilmek için araştırma ve geliştirme yönünde daha çok çaba sarf edilmelidir.

5.2.5 CO ve HC Emisyonlarının Kontrolü

Özellikle düşük yüklerde HCCI operasyonlarındaki sıcaklıklar çok düşük olduğu için silindir cidarına yakın bölgelerdeki yakıtın yanamamasından ve aynı zamanda CO oksidasyon reaksiyonlarının tamamlanamamasından ötürü HCCI motorlarında HC ve CO emisyonlarının genellikle yüksek seviyede seyir ettiği görüldü. Tüm homojen dolgulu yanma sistemlerinde görüldüğü üzere silindir içindeki yakıtın önemli bir kısmı, sıkıştırma stroku sırasında yarık hacimlerde birikir ve böylece yanma prosesine katılmaz. Ard işlem prosesinin verimsiz olmasına neden olan düşük egzost gaz sıcaklıklarında problem artar. Silindir cidarlarının yanma üzerindeki söndürücü etkisini azaltmak için cidar yalıtımı, katalistik (katalizör) kaplama ve piston başı yarık hacimlerinin azaltılması gibi çözümler üretildi. Aşırı doldurmanın ve arttırılmış emme havası sıcaklıklarının aynı zamanda HC emisyonlarını azalttığı görüldü. HCCI operasyonlarındaki son derece fakir karışımların, kısa süren hızlı yanmanın ve yüksek genişleme oranının neticesinde oluşan düşük egzost gaz sıcaklıkları, oksidasyon katalizörü kullanılmasına karşı büyük bir engel teşkil etmektedir. Verim kaybı ve/veya NO_x emisyonlarında artış olmadan yüksek egzost gaz sıcaklıklarının temin edilmesi önemlidir. Düşük-sıcaklık katalizi (tezleştirmesi) için doğru malzemelerin seçilmesi aynı zamanda önemli bir faktördür (Erlandsson vd., 2000). Diesel yakıtlı HCCI operasyonlarındaki HC emisyonlarını katalizörlerin kullanılmadığı klasik diesel operasyonlarındaki seviyelere azaltmak için oksidasyon katalizörüne benzer bir katalizör kullanılması durumunda emme havasının silindire giriş sıcaklığı yaklaşık 470 K veya daha yüksek olmalıdır (Iwabuchi vd., 1999).

5.2.6 Sistemli Kapalı-Döngü Kontrolü İçin Sensör Gelişimi

HCCI yanma prosesi için bir geribesleme kontrol çevriminin bulunmaması, bu potansiyel yanma prosesinin başarılı bir şekilde yerine getirilmesine engel olmaktadır. HCCI yanma prosesini kontrol edebilen ve böylece geribesleme kontrol çevrimi için gerekli datayı sağlayabilen uygun bir sensörün kullanılması, HCCI yanma sisteminin optimizasyonu için çok önemlidir. Şimdilik bu tür bir uygulama için en iyi sensörü belirlemek üzere yeterli data mevcut değildir. HCCI yanma prosesi ile ilgili olarak veri toplama ve geribesleme proseslerini sağlamak üzere silindir içi basınç sensörleri kullanıldı (Olsson vd., 2001a). Açığa çıkan ısının %50' lik kısmına denk gelen krank açıları, her bir çevrim için gerçek sürede (anında) ölçülmektedir ve geribesleme prosesinin ayarı (zamanlaması) için kullanılmaktadır. Açığa çıkan ısının ölçümü, sıkıştırma strokunda ÜÖN' ya göre -30° ila 60° arasındaki bir krank açısı aralığında tamamlanmaktadır. IMEP ölçümü, tüm çevrim üzerinden yapılmaktadır. Söylenildiği şekilde zamanlama kontrolü, hesaplanan hassasiyet için her zaman doğru değerler veren bir algoritmaya çok fazla bağımlıdır. Zamanlama kontrol aygıtının optimizasyonu, hassasiyet haritasının kalitesi ile sınırlıdır. Eğer hassasiyet tahminleri (hesapları) doğrulanamazsa kararsızlığı önlemek için kontrol aygıtının kazançları tutucu olmalıdır. Yük kontrol çevriminin band genişliği, zamanlama kontrolünün performansı ile sınırlıdır. Kontrol sisteminin önemli bir özelliği, sensör ölçümleri ile kontrol hesaplaması arasında ve kontrol hesaplaması ile kontrol hareketi arasında bir gecikme olmasıdır ki bu gecikmeler, HCCI gibi hızlı yanma prosesinde çevrim tabanlı bir seviye kontrolünün sağlanabilmesi hususunda çok kritik bir durum arz etmektedir. Bu yüzden basınç sensörlerinden daha iyi sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Yanma prosesi sırasında oluşan radikalleri kontrol etmek için optik sensör, benzinli motorlarda kullanılan ateşleme bujisi tabanlı (içerikli) iyonizasyon sensörü ve diesel motorlarda kullanılan ısıtma bujisi tabanlı iyonizasyon sensörü gibi başka özellikteki sensörler de literatürde yer almaktadır. Fakat bu sensörlerin fizibilitesini değerlendirebilmek için yeterli teknik bilgi mevcut değildir. Gelecekte bu alandaki geliştirme çabaları artış gösterecektir.

5.3 HCCI Operasyonunun Kontrolü ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi İçin Bazı Yaklaşımlar

HCCI yanma adından da anlaşıldığı üzere iki ana prosesten oluşmaktadır. Bu proseslerden biri homojen bir karışım oluşturulması ve diğeri ise bu homojen karışımın kendi kendine tutuşması olayıdır. Pratik bir şekilde bu iki prosesin gerçekleştirilmesi kolay değildir. Taşıt motorlarının her bir çevrimde maruz kaldığı sınırlı zaman skalasına (sürecine) ve mevcut karışım hazırlama tekniklerinin yetersiz kalmasına bağlı olarak ideal bir homojen karışımın

oluşturulması neredeyse imkansızdır. Yakıt, hava ve EGR/art gazlar arasındaki konsantrasyon (yoğunluk) gradyanları (kademeleri), kendi kendine tutuşma prosesi esnasında varlıklarını sürdürmektedir. Ayrıca motor operasyonlarının termik (ısı) dengesizlik karakteristiğinin sonucu olarak yanma odası boyunca var olan sıcaklık gradyanları (kademeleri), aynı zamanda karışım hazırlama proseslerinden etkilenmektedir. Sonuç olarak karışımın kompozisyonu (bileşimi, konsantrasyonu ve sıcaklığı) kendi kendine tutuşma prosesi esnasında homojen değildir ve ideal HCCI motorunda görülen bir çok noktada ani olarak gerçekleşen kendi kendine tutuşma prosesi pratik uygulamalarda gözlemlenemez. Seri üretimine geçilmiş olup veya ticari uygulamalar için yüksek bir potansiyele sahip olarak oldukça kabul gören HCCI konseptlerinin tümü, sahte HCCI (veya HCCI benzeri) sistemleridir. Bu sistemler, bu yeni yanma prosesinin avantajlarını büyük ölçüde kullanacak şekilde tasarlanmaktadır fakat yine de karışımın hazırlanışı ve yanma kontrolü yönünden bu yanma prosesinin, tüm karakteristiği yansıtılmamaktadır. Bu sistemler, ideal HCCI yanma sistemlerine ait avantajların çoğunu sağlamaktadır. Bunun yanı sıra kuvvetli bir kontrol yetisinin dahilinde sistemin donanım gereksinimini basitleştirmek amacıyla yakıt-hava karışımını hazırlamak ve daha sonra yanma olayını başlatmak için geleneksel teknikler kullanılmaktadır. Literatür bazında yoğun bir şekilde araştırılan ve tartışılan muhtelif sistemler, bu bölümde kısaca tanıtılmaktadır.

5.3.1 MK (Modulated Kinetics)

Bu yanma sistemi, Nissan mühendisleri tarafından geliştirildi ve 1998 yılında Japon pazarına sürüldü (Kimura vd., 1999a). Bu sistem, “homojen” diesel yakıtlı yanmayı sağlamak için silindir içine yapılan geç zamanlamalı direkt yakıt püskürtme stratejisini kullanmaktadır. Yoğun biçimde uygulanan EGR’ nin ve düşük sıkıştırma oranının varlığında yapılan geciktirilmiş püskürtme, tutuşma gecikmesi süresini uzatır ve böylece yakıt-hava karışımının oluşumu için daha çok süre yaratılmış olunur. Yüksek türbülanslı silindir içi akışın varlığında köşeli olmayan (toroidal) bir piston oyuğunun kullanılması, püskürtülen yakıtın silindir içinde kolayca dağıtılmasını sağlar. Yanma prosesindeki ön karışım dolgu oranını arttırmak için tutuşma gecikmesi süresini uzatarak ve bu tutuşma gecikmesi süresi zarfında püskürtülen yakıtı etkili bir şekilde dağıtarak yeterli derecede yakıt-hava karışımı sağlanır. Yakıt püskürtme süresi, tutuşma gecikmesi süresinden daha kısa olmalıdır. Sonuç olarak yakıt püskürtme prosesi sonlandıktan sonra yanma meydana gelmektedir ve böylece genelde klasik diesel motorlarında görülen yanma (alev) jeti olayına imkan verilmemektedir. Bununla birlikte EGR kullanılması, sıkıştırma oranının azaltılması ve türbülanslı hava akışından oluşan bir grup teknik eğer beraber uygulanmazsa bu metot, tutuşma gecikmesi sürelerinin kısa oluşundan ötürü olumsuzluk yaşar. Yakıtın tutuşma gecikmesi süresi zarfında yakıt-hava

karışımının hangi mertebede sağlanabildiği bu yanma sisteminin gerçekleştirilmesindeki kilit noktadır. Şu açıktır ki bu ‐HCCI-benzeri‐ yanma sistemi, HCCI yanmanın klasik tanımına uymamaktadır çünkü karışımın homojen olması garanti edilememektedir. Fakat bu HCCI benzeri yanma sistemi (MK), ideal HCCI yanmanın hem emisyonlar hem de yakıt verimi yönündeki avantajlarını kullanacak şekilde sahte-HCCI yanma prosesinin gerçekleştirilebilmesi için klasik diesel sistem donanımının kullanılabilirliğine mükemmel bir örnek teşkil etmektedir.

5.3.2 UNIBUS (UNiform BULky combustion System)

Bu yanma sistemi, klasik diesel donanımının varlığında yanma prosesini gerçekleştirmek üzere iki safhalı yakıt püskürtme stratejisini kullanmaktadır. Bu yanma sistemi, 2000 yılında Japon pazarı için diesel motorlu taşıtlara uygulandı (Yanagihara, 2001a). Bu yanma prosesi, ÜÖN’ dan çok önce yapılan erken püskürtme ve ÜÖN’ dan çok sonra yapılan geç püskürtme tekniklerini klasik diesel operasyonu sistem donanımı ile ‐HCCI-benzeri‐ avantajlar elde edebilmek için birleştirmektedir. Seri üretim motoru, yakıt-hava karışımının hazırlanması için açık tip memeli klasik bir yüksek basınçlı common-rail püskürtme sistemini kullanmaktadır. UNIBUS sisteminin başarısının, iki safhalı püskürtme stratejisinin optimizasyonuna son derece bağlı olduğu görülmektedir. İkinci püskürtme prosesindeki püskürtme zamanlaması ve püskürtülen yakıt miktarı, ilk püskürtülen yakıtın yanma veriminin iyileştirilmesi ve ayrıca HC ve CO emisyonlarının azaltılması için çok önemli bir konudur. İkinci püskürtmeden gelen yakıtın yanması, ilk püskürtülen yakıtın açığa çıkan ısısının bir kısmı için tetikleyici olarak iş görmektedir. Geç zamanlamalı ikinci püskürtme prosesine rağmen NO_x ve PM emisyonları oldukça düşük bir seviyededir. Şu açıktır ki UNIBUS yanma sistemi, bir seri üretim motorunda klasik diesel sistem donanımı kullanılarak sahte-HCCI yanma proseslerinin gerçekleştirilebildiği diğer bir mükemmel örneği teşkil etmektedir.

5.3.3 Bölünmüş (Çok Kademeli Püskürtme) Püskürtme

Bölünmüş püskürtme, geleneksel diesel yanma prosesini değiştirmedeki esnekliğinden ötürü modern diesel motorların yanma ve emisyon karakteristiklerini iyileştirmek için kapsamlı bir şekilde incelenmektedir (Yokota vd., 1997; Hashizume vd., 1998). Bölünmüş püskürtme stratejisi, yakıt püskürtme zamanlaması yoluyla HCCI-benzeri yanmanın avantajını kullanarak ve aynı zamanda klasik diesel operasyonunun kontrol kabiliyetinden yararlanarak yanma prosesini optimize edebilir. Erken yakıt püskürtme genel eğilimi neticesinde yakıt ve havanın karışması için yeterli zaman mevcuttur. Geç zamanlamalı hafif (belirsiz) yakıt püskürtmesi, ısı açığa çıkış hızının daha iyi kontrol edilebilmesini sağlar. Daha geç yapılan

püskürtme aynı zamanda yanmakta olan yakıtın içine havanın emilmesini kolaylaştırabilir ve böylece daha düşük duman emisyonları elde edilebilir. Şunu belirtmekte fayda vardır ki bu yanma kontrol stratejisi, farklı yakıt püskürtme zamanlamalarına karşı farklı karakteristikteki yakıt hüzmelerine duyulan ihtiyaçtan ötürü yakıt püskürtme sistemine çok büyük bir yük getirmektedir.

5.3.4 Değişken Supap Hareketi ile Birlikte Direkt Benzin Püskürtmesinin Uygulanması
HCCI yanma prosesini kontrol etmek için egzost supabının erken kapatılmasını ve silindir içine yakıt püskürtülmesini kapsayan bir konsept ileri sürüldü (Willand vd., 1998). Egzost supabının erken kapatılması, HCCI yanma prosesini başlatmak için gerekli olan sıcaklığın bir kısmını sağlamak üzere art gazların önemli bir miktarını silindir içinde tutar. Yakıt, bir benzin DI enjektörü vasıtasıyla direkt olarak silindire esnek bir tarzda püskürtülebilir. Egzost supabının kapatılma zamanının optimizasyonuna göre büyük bir serbestlik derecesiyle art gazın miktarı ayarlanabilir. Yakıt püskürtme prosesi, egzost gazının tekrar sıkıştırılması esnasında gerçekleştirilebilir ve böylece yakıtın kolayca buharlaşabilmesi için bu tekniğin sağladığı ısıtma ve zaman avantajından yararlanılmış olunur. Yanma hızının kontrol edilebilmesi için kademeli yakıt dağılımını sağlamak üzere geç yakıt püskürtme zamanlaması kullanılabilir. Bu HCCI yanma stratejisinin gelişimine bağlı olarak benzinli DI motoru, yakıt verimini maksimize etmek için düşük yükte ard işlem sistemine ihtiyaç olmadan bu benzersiz yanma prosesinin tüm avantajını kullanmak üzere kontrol opsiyonlarının bir parçası olarak HCCI çalışma modunu kapsayacak şekilde ayarlanabilir.

5.3.5 İki Bölge (Fakir Karışım) SI Yanması / Homojen Yanma) Hibrid Yanma
Çevrimin bir önceki kademeli fakir SI yanma prosesinde oluşan sıcak yanmış gazı kullanarak HCCI yanmanın tutuşmasını kontrol etmek için bir strateji ileri sürüldü (Yamamoto vd., 2002). Bu yanma prosesi, 6-strokluk benzinli DI SI motoru için iki bölge hibrid yanma olarak adlandırılmaktadır. Bu 6-strokluk motor, klasik bir 4-strokluk benzinli DI motorunun motor kontrolünün (püskürtme zamanlamalarının), kam milinin ve kam tahrik dişli oranının değiştirilmesi suretiyle herhangi başka bir önleme gerek kalmadan elde edildi. Bir çevrimde iki ayrı yanma prosesi gerçekleştirilmektedir. Dolgu değişimi prosesinden sonra kademeli son derece fakir SI yanması gerçekleştirilmektedir. Bu SI yanma prosesinde oluşan sıcak-yanmış gaz, bir sonraki HCCI yanma prosesini tetiklemesi için kullanılmaktadır. Yanmış gazın içine benzin genişleme strokunda püskürtüldükten sonra sıcak ve homojen fakir karışım, egzost supapları açılmadığı halde tekrar sıkıştırılır. HCCI operasyonunun tutuşma zamanlaması, gaz kompozisyonundan daha ziyade gaz sıcaklığına bağlıdır ve kademeli SI yanmasında

kullanılan son derece fakir yakıt-hava karışımının ve yüksek EGR miktarının neticesinde etkili bir şekilde kontrol edilmektedir. Motorun torku, esas olarak HCCI yanma prosesi için püskürtülen yakıt miktarıyla kontrol edilmektedir. Söylenildiğine göre HCCI yanma prosesinin kararlı olabilmesi için kademeli dolgulu SI yanma prosesinin kararlı olması gereklidir çünkü HCCI yanma prosesinin tutuşma zamanlaması, kademeli dolgulu SI yanma prosesi tarafından belirlenen silindir içi koşullara bağlıdır.

5.4 Gelecek Hedefleri

Şu açıktır ki HCCI motorlar konusunda birçok araştırma ve geliştirme faaliyeti dünya genelinde yürütülmektedir. HCCI konseptinin tüm yararlarını sağlayabilmek için aşılması zorunlu olan bir takım engeller hala mevcuttur. HCCI motor gelişiminde kendi kendine tutuşma zamanlamasının ve yanma hızının kontrolü önem arz eden uğraştırıcı bir konu olarak hala güncelliğini korumaktadır. Motor çalışma koşullarının geniş bir aralığında özellikle hızlı mod değişimleri esnasında HCCI prosesini etkili bir şekilde kontrol edebilen bir yaklaşım henüz belirlenemedi. HCCI motorundaki başarının, HCCI yanma olayını gerçekleştirmenin etkili bir yolunu sağlayacak olan değişken sıkıştırma oranı ve değişken supap tahrik sistemleri gibi diğer teknolojilerin başarılı gelişimine son derece bağlı olabileceğine inanılmaktadır.

Tüm yüklerde çalışabilen bir HCCI motoru arzulanmaktadır fakat bu motorun, klasik diesel veya stokiyometrik SI motorları ile mukayese edilebilir güç üretmedeki becerisi hala bir soru teşkil etmektedir. Stokiyometrik hava-yakıt oranları HCCI operasyonlarında kullanılabilirse bile emisyon ve verimlilik bakımından sağlanan yararlar çok azdır. HCCI yanma prosesi, yakın dönemdeki taşıt uygulamalarında “çift modlu” operasyonların varlığında en iyi şekilde uygulanabilir. Bu çalışma tarzında, düşük ve orta yüklerde HCCI operasyonlarının yararlarından faydalanılmaktadır ve boşa yakın çok düşük yüklerde, ağır yüklerde ve ilk hareket esnasında klasik yanma modlarından biri kullanılmaktadır. Şimdiye kadar HCCI operasyonları diesel motor uygulamalarında en büyük başarıyı göstermektedir ki orada klasik yakıt püskürtme zamanlamaları ile sahte-HCCI (veya HCCI-benzeri) motorları elde edilmektedir ve böylece yanma sağlandığı sürece HCCI operasyonunun düşük emisyon avantajından yararlanılmaktadır. HCCI yanma modunu pratiğe taşımak amacıyla HCCI yanma olayının doğru anda başlatılması, ısı açığa çıkış hızının kontrol edilmesi, ilk hareket olasılığının incelenmesi, HC ve CO emisyonlarının daha fazla azaltılması ve son olarak hızlı mod değişimleri esnasında kabul gören operasyonların elde edilmesi için stratejiler ve yaklaşımlar geliştirmek üzere araştırma ve geliştirme hususunda daha yapılacak çok iş vardır. Seri üretim motorlarında motor çalışma koşullarının geniş bir aralığında yanma prosesinin

optimizasyonunu gerçekleştirmek için geribesleme ve sistemli kapalı-döngü kontrolü hususunda metodolojiler geliştirmek üzere çalışmalar sıkı bir şekilde yürütölmektedir. evrim tabanında sistem kontrolünü sağlamak için spesifik (özel) bir HCCI sensörü geliştirmenin fizibilitesini ve gerekliliğini araştırma hususunda da büyük bir uğraş söz konusudur.

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Küresel ısınmanın ve hava kirliliğinin önlenmesi hususunda katı emisyon mevzuatını karşılamak üzere dünya genelinde içten yanmalı motorların termik verimini iyileştirmek ve emisyonlarını azaltmak için çalışmalar büyük hızla yürütülmektedir. Diesel motorlarda yakıt, yüksek bir sıcaklıktaki sıkıştırılmış havanın içerisine püskürtülmektedir. Yakıt püskürtmesinden gelen yakıt demeti içindeki tek bir damlacık bile önemsiz sayılabilecek (az) bir gecikme ile tutuşabilir ve alev yayılımı olmadan yanar çünkü yüksek setan sayılı diesel yakıtı için kendi kendine tutuşma prosesi kolayca gerçekleşir. Yüksek sıkıştırma oranından ötürü termik verim yüksektir. Bununla birlikte bu kademeli dolgulu sıkıştırma tutuşmalı (SCCI) yanma, çok miktarda NO_x ve is oluşturur çünkü lokal olarak aşırı zenginlik ve genelde fakir yanma söz konusudur. Diesel motorların gelecek uygulamaları, bir ard işlem sistemi kullanılmadan NO_x ve is emisyonlarının beraber azaltılması yönünde hiçbir çözüm getirmemektedir. Diğer taraftan benzinli SI motorları daha çok HC, CO ve NO_x emisyonu ürettiği halde bu motorların emisyonlarının azaltımı üç-işlevli katalizör teknolojileri ile sağlanmaktadır. Benzinli SI motorları ile ilgili en önemli mesele, diesel motorlarla kıyaslama yapıldığında termik verimin oldukça düşük kalmasıdır. Ön karışımli dolgu, bir kıvılcım ateşi ile tutuşturulur ve oluşan alev çekirdeği, tüm silindir boyunca yayılır. Benzin/hava karışımının yanabilirlik sahası dardır çünkü yüksek oktan sayılı benzini yakmak zordur. Bu nedenle homojen dolgulu buji ateşlemeli (HCSI) yanma, kısmi yüklerde benzin/hava oranını sabit tutabilmek için pompalama kayıplarına neden olur çünkü gaz kelebeği yarı-kapalı konumdadır. Bundan başka ağır yüklerde vuruş gerçekleşir çünkü alev yayılımı, silindir cidarı yakınındaki sıcak karışım içindeki kendi kendine tutuşma reaksiyonuyla kıyaslandığında yavaş kalmaktadır. Bu sebepten ötürü sıkıştırma oranı, termik verimi iyileştirmek için yükseltilemez.

Yukarıda bahsedilen meseleleri çözmek üzere benzinli SI motorları için direkt püskürtme teknolojileri, dünyadaki çalışmaların odaklandığı bir konu haline gelmiştir. Bu teknolojiler vuruşu önler çünkü silindir içine püskürtülen yakıtın buharlaşma gizli ısısı, dolgu (gaz) sıcaklığını düşürür. Bu sebepten ötürü daha yüksek bir sıkıştırma oranı kullanılabilir. Ayrıca kademeli dolgulu buji ateşlemeli (SCSI) yanma, kısmi yüklerdeki termik verimi iyileştirir çünkü pompalama kayıplarında bir azalma söz konusudur. Kademeli dolgu, sıkıştırma strokunun son evrelerine doğru yapılan geç püskürtme ile hazırlanmaktadır. Ateşleme bujisi çevresinde toplanan lokal zengin karışım, son derece (aşırı) fakir yanma operasyonu sırasındaki kararlı alev yayılımını sağlar. Bu yanma prosesinin yüksek EGR toleransı sayesinde NO_x emisyonları büyük ölçüde azaltılabilir çünkü bu uygulama, silindir içindeki

yanmış-gaz sıcaklığını düşürmektedir. Bununla birlikte düşük sıcaklık NO_x katalizör teknolojileri kullanılmadan son katı emisyon mevzuatının karşılanması zordur.

Homojen dolgulu sıkıştırma tutuşmalı (HCCI) motorların gelecekte hem temiz emisyon hem de yüksek termik verim sağlayacağı düşüncesi hakimdir. HCCI yanma prosesi, yakıtın kimyasal kinetikleri (kimyasal reaksiyon mekanizmaları) ile domine edilmektedir. Sıcak ve homojen yakıt/hava karışımının sıcaklığı, yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığını aştığında tutuşma silindir içindeki birçok noktada alev yayılımı olmadan spontane bir biçimde (kendiliğinden) gerçekleşir. Bu yanma tarzı çok düşük NO_x emisyonu üretir çünkü alevin sıcaklığı, NO_x üreten sıcaklıklardan daha düşük kalmaktadır. Bundan başka HCCI yanma, is oluşturmadan yüksek termik verim sağlar çünkü homojen fakir-yanma, pompalama kayıplarını minimize eder. Bununla birlikte HCCI operasyon sahası, düşük yüklere ve düşük hızlara kapalıdır çünkü geciken tutuşma zamanlaması, motorun çalışması için kritik bir durum teşkil etmektedir. Tutuşmayı kontrol altında tutmak üzere homojen karışımın basıncı ve sıcaklığı, yakıt/hava denklik oranı tüm çalışma koşulları altında tam olarak kontrol edilmek zorundadır. Yakıt özellikleri de önemli parametrelerdendir çünkü basıncın ve sıcaklığın tutuşma gecikmesi üzerine olan etkisi yakıtla bağlı olarak farklılık göstermektedir. Motorun geniş bir hız ve yük sahasında tutuşmayı kontrol etmek üzere birçok araştırmacı, yüksek bir sıkıştırma oranı (benzin için), ön ısıtmalı emme havası, EGR' nin yoğun miktarı, değişken supap zamanlaması vasıtasıyla art gaz ve farklı setan sayılı çift-yakıt gibi bazı metotların kullanılmasını ileri sürdü. Bununla birlikte seri üretim motorlarında kullanılmak üzere makul ve gerçekçi stratejiler henüz belirlenemedi. Diesel yakıtı HCCI yanma prosesi için daha uygun bir yakıt olarak değerlendirilmektedir. Değişken sıkıştırma oranı uygulamasının, HCCI operasyonlarının başarılı bir şekilde motorun tüm hız ve yük sahası boyunca gerçekleştirilmesinde kesin çözüm olacağı düşüncesi hakimdir.

KAYNAKLAR

- Aceves, S. M. ve diğerleri, (2000), "A multi-zone model for prediction of HCCI combustion and emissions", SAE Technical Paper, No. 2000-01-0327.
- Akagawa, H., Miyamoto, T., Harada, A., Sasaki, S., Shimazaki, N., Hashizume, T. ve Tsujimura, K., (1999), "Approaches to solve problems of the premixed lean diesel combustion", SAE Technical Paper, No. 1999-01-0183.
- Alperstein, M., Swim, W. B. ve Schweitzer, P. H., (1958), "Fumigation kills smoke – improves diesel", SAE Transactions, Vol. 66, pp. 574-595.
- Alam, M. ve diğerleri, (2001), "Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Operated with LPG and Ignition Improving Additives", SAE Technical Paper, No. 2001-01-3680.
- Allen, J. ve diğerleri, (2002), "Variable valve actuated controlled auto-ignition: speed load maps and strategic regimes of operation", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0422.
- Al-Rubaie, M. A. R. ve diğerleri, (1991), "Some Observation on the Effectiveness of Additives for Reducing the Ignition Delay Period of Diesel Fuels", SAE Technical Paper, No. 912333.
- Aroonsrisopon, T. ve diğerleri, (2002b), "An Investigation Into the Effect of Fuel Composition on HCCI Combustion Characteristics", SAE Technical Paper, No. 2002-01-2830.
- Bailey, B. ve diğerleri, (1997), "Diethyl Ether (DEE) as a Renewable Diesel Fuel", SAE Technical Paper, No. 972878.
- Chapman, E. M. ve diğerleri, (2001), "Emissions Characteristics of a Navistar 7.3L Turbodiesel Fueled with Blends of Dimethyl Ether and Diesel Fuel", SAE Technical Paper, No. 2001-01-3626.
- Chen, Z. ve diğerleri, (2000), "Experimental Study of CI Natural-Gas/DME Homogeneous Charge Engine", SAE Technical Paper, No. 2000-01-0329.
- Chen, Z. ve diğerleri, (2001), "Study on Homogeneous Premixed Charge CI Engine Fueled with LPG", JSAE Technical Paper, No. 2001-01-4339.
- Cheng, A. S. ve diğerleri, (1999), "Emissions Performance of Oxygenate-in-Diesel Blend and Fischer-Tropsch Diesel in a Compression Ignition Engine", SAE Technical Paper, No. 1999-01-3606.
- Cheng, A. S. ve diğerleri, (2002), "The Effect of Oxygenates on Diesel Engine Particulate Matter", SAE Technical Paper, No. 2002-01-1705.
- Chevron Products Company, (1996), Motor Gasoline Technical Review FTR-1.
- Chevron Products Company, (1998), Diesel Fuels Technical Review FTR-2.
- Christensen, M. ve diğerleri, (1997), "Homogeneous Charge Compression Ignition Using Iso-octane, Ethanol and Natural Gas – A Comparison with Spark Ignition Operation", SAE Technical Paper, No. 972874
- Christensen, M. ve diğerleri, (1998a), "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition", SAE Technical Paper, No. 980787.
- Christensen, M., Hultqvist, A. ve Johansson, B., (1999a), "Demonstrating the multi fuel capability (capacity) of a homogeneous charge compression ignition engine with variable compression ratio", SAE Technical Paper, No. 1999-01-3679.

Christensen, M. ve diğerleri, (1999b), "Homogeneous charge compression ignition with water injection", SAE Technical Paper, No. 1999-01-0182.

Christensen, M. ve diğerleri, (2000), "Supercharged homogeneous charge compression ignition (HCCI) with exhaust gas recirculation and pilot fuel", SAE Technical Paper, No. 2000-01-1895.

Christensen, M. ve diğerleri, (2001), "The effect of piston topland geometry on emissions of unburned hydrocarbons from a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine", SAE Technical Paper, No. 2001-01-1893.

Christensen, M. ve diğerleri, (2002a), "The effect of combustion geometry on HCCI operation", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0425.

Christensen, M. ve diğerleri, (2002b), "The effect of in-cylinder flow and turbulence on HCCI operation", SAE Technical Paper, No. 2002-01-2864.

Clothier, P. Q. E. ve diğerleri, (1990), "Effect of Free-Radical Release on Diesel Ignition Delay Under Simulated Cold-Start Conditions", Comb and Flame, Vol. 81.

Clothier, P. Q. E. ve diğerleri, (1993), "Synergy Between Additives in Simulating Diesel-Fuel Ignition", Comb and Flame, Vol. 95.

Cracknell, R. ve diğerleri, (2002), "Safety Considerations in Retailing Hydrojen", SAE Technical Paper, No. 2002-01-1928.

Curran, H. J. ve diğerleri, (1998), "A Wide Range Modeling Study of Dimethyl Ether Oxidation", International Journal of Chem Kinetics, Vol. 30: 229-241.

Curran, H. J. ve diğerleri, (2000), "The Reaction Kinetics of Dimethyl Ether. II: Low-Temperature Oxidation in Flow Reactors", International Journal of Chem Kinetics, Vol. 32.

Daeyup, L. ve diğerleri, (1993), "Auto-ignition of Alcohols and Ethers in a Rapid Compression Machine", SAE Technical Paper, No. 932755.

Dec, J., (2002), "A computational study of the effect of low fuel loading and EGR on heat release rates and combustion limits in HCCI engines", SAE Technical Paper, No. 2002-01-1309.

Duret, P. ve diğerleri, (1996), "Automotive Calibration of the IAPAC Fluid Dynamically Controlled Two-Stroke Combustion Process", SAE Technical Paper, No. 960363.

Edgar, B. L. ve diğerleri, (1997), "Auto-ignition of Dimethyl Ether and Dimethoxy Methane Sprays at High Pressures, SAE Technical Paper, No. 971677.

Eng, J. A. ve diğerleri, (2002a), "The Effect of PO_x on the auto-ignition Chemistry of n-Heptane and Iso-octane in an HCCI Engine", SAE Technical Paper, No. 2002-01-2861.

Eng, J. A., (2002b), "Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion", SAE Technical Paper, No. 2002-01-2859.

Epping, K., Aceves, S., Bechtold, R. ve Dec, J., (2002), "The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions", SAE Technical Paper, No. 2002-01-1923.

Erlandsson, O. ve diğerleri, (2000), "Hydrocarbon (HC) reduction of exhaust gases from a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine using different catalytic mesh-coatings", SAE Technical Paper, No. 2000-01-1847.

- Fischer, S. L. ve diğerleri, (2000), "The Reaction Kinetics of Dimethyl Ether. I: High-Temperature Pyrolysis and Oxidation in Flow Reactors", *International Journal of Chem Kinetics*, Vol. 32.
- Fiveland, S. ve diğerleri, (2001), "Experimental and Simulated Results Detailing the Sensitivity of Natural Gas HCCI Engines to Fuel Composition", *SAE Technical Paper*, No. 2001-01-3609.
- Flowers, D. ve diğerleri, (2001), "Operation of a Four-Cylinder 1.9L Propane Fueled Homogeneous Charge Compression Ignition Engine: Basic Operating Characteristics and Cylinder-to-Cylinder Effects", *SAE Technical Paper*, No. 2001-01-1895.
- Furutani, M. ve diğerleri, (1998), "An ultra-lean premixed compression-ignition engine concept and its characteristics", *Proceedings of COMODIA'98*, pp. 173-177.
- Gardner, T. P. ve diğerleri, (2001), "Evaluation of Some Alternative Diesel Fuels for Low Emissions and Improved Fuel Economy", *SAE Technical Paper*, No. 2001-01-0149.
- Gentili, R. ve diğerleri, (1997), "Experimental study on ATAC (Active Thermo-Atmosphere Combustion) in a two stroke gasoline engine", *SAE Technical Paper*, No. 970363.
- Girard, J. W. ve diğerleri, (2002), "An Investigation of the Effect of Fuel-Air Mixedness on the Emissions from an HCCI Engine", *SAE Technical Paper*, No. 2002-01-1758.
- Goto, S. ve diğerleri, (1999), "Development of an LPG DI Diesel Engine Using Cetane Number Enhancing Additives", *SAE Technical Paper*, No. 1999-01-3602.
- Gray, A. ve Ryan III, T. W., (1997), "Homogeneous charge compression ignition (HCCI) of diesel fuel", *SAE Technical Paper*, No. 971676.
- Harada, A., Shimazaki, N., Sasaki, S., Miyamoto, T., Akagawa, H. ve Tsujimura, K., (1998), "The effects of mixture formation on premixed lean diesel combustion", *SAE Technical Paper*, No. 980533.
- Haraldsson, G. ve diğerleri, (2002), "HCCI combustion phasing in a multi cylinder engine using variable compression ratio", *SAE Technical Paper*, No. 2002-01-2858.
- Hashizume, T., Miyamoto, T., Akagawa, H. ve Tsujimura, K., (1998), "Combustion and emissions characteristics of multiple stage diesel combustion", *SAE Technical Paper*, No. 980505.
- He, D. ve diğerleri, (2000), "Contribution Feedstock and Fuel Transportation to Total Fuel-Cycle Energy Use and Emissions", *SAE Technical Paper*, No. 2000-01-2976.
- Hiraya, K. ve diğerleri, (2001), "A study of gasoline fueled compression ignition engine – a trail of operation region expansion", *Proceedings of the JSAE Convention (in Japanese)*, No. 98-01, pp. 9-14.
- Hiraya, K. ve diğerleri, (2002a), "A study on gasoline fueled compression ignition engine – a trail of operation region expansion", *SAE Technical Paper*, No. 2002-01-0416.
- Hiraya, K. ve diğerleri, (2002b), "A Study of Gasoline Fueling (Fueled) Compression Ignition Engine", *JSAE Technical Paper (in Japanese)*, No. 2002-01-5006.
- Iida, N. ve diğerleri, (1994), "Combustion Analysis of Methanol-Fueled Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) Engine Using a Spectroscopic Observation", *SAE Technical Paper*, No. 940684.

- Iida, N. ve diğerleri, (2000), "Auto-ignition and Combustion of n-Butane and DME/Air Mixtures in a Homogenous Charge Compression Ignition Engine", SAE Technical Paper, No. 2000-01-1832.
- Ishibashi, Y. ve diğerleri, (1996), "Improving the exhaust emissions of two-stroke engines by applying the Activated Radical Combustion", SAE Technical Paper, No. 960742.
- Ishii, H., Koike, N., Suzuki, H. ve Odaka, M., (1997), "Exhaust purification of diesel engines by homogeneous charge with compression ignition Part 2: Analysis of combustion phenomena and NO_x formation by numerical simulation with experiment", SAE Technical Paper, No. 970315.
- Iwabuchi, Y., Kawai, K., Shoji, T. ve Takeda, Y., (1999), "Trial of new concept diesel combustion system – premixed compression-ignited combustion", SAE Technical Paper, No. 1999-01-0185.
- Iwashiro, Y. ve diğerleri, (2002), "Fuel consumption improvement and operation range expansion in HCCI by direct water injection", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0105.
- Johnson, J. W. ve diğerleri, (2001), "Emissions From Fischer-Tropsch Diesel Fuels", SAE Technical Paper, No. 2001-01-3518.
- Kaahaaina, N. ve diğerleri, (2001), "Use of Dynamic Valving to Achieve Residual-Affected Combustion", SAE Technical Paper, No. 2001-01-0549.
- Kaimai, T. ve diğerleri, (1999), "Effects of a Hybrid Fuel System with Diesel and Premixed DME/Methane Charge on Exhaust Emissions in a Small DI Diesel Engine", SAE Technical Paper, No. 1999-01-1509.
- Kajiwara, M. ve diğerleri, (2002), "Performance and Emissions Characteristics of an LPG Direct Injection Diesel Engines", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0869.
- Kalghatgi, G. T., (2001), "Fuel Anti-Knock Quality – Part I. Engine Studies", SAE Technical Paper, No. 2001-01-3584.
- Kaneko, N., Ando, H., Ogawa, H. ve Miyamoto, N., (2002), "Expansion of the operating range with in-cylinder water injection in a premixed charge compression ignition engine", SAE Technical Paper, No. 2002-01-1743.
- Karpuk, M. E. ve diğerleri, (1988), "On Board Dimethyl Ether Generation to Assist Methanol Engine Cold Starting", SAE Technical Paper, No. 881678.
- Kawashima, J. I., Ogawa, H. ve Tsuru, Y., (1998), "Research on a variable swirl intake port for 4-valve high-speed DI diesel engine", SAE Technical Paper, No. 982680.
- Kelly-Zion, P. ve Dec, J., (2000), "A Computational Study of the Effect of Fuel-Type on Ignition Time in HCCI Engines", Proceedings of the 28th International Symposium, Part 1, pp. 1187-1194.
- Kimura, S., Aoki, O., Ogawa, H., Muranaka, S. ve Enomoto, Y., (1999a), "New combustion concept for ultra-clean and high-efficiency small DI diesel engines", SAE Technical Paper, No. 1999-01-3681.
- Kimura, S., Aoki, O., Kitahara, Y. ve Aiyoshizawa, E., (2001), "Ultra-clean combustion technology combining a low-temperature and premixed combustion concept for meeting future emission standards", SAE Technical Paper, No. 2001-01-0200.
- Kontarakis, G. ve diğerleri, (2000), "Demonstration of HCCI Using a Single Cylinder Four-Stroke SI Engine with Modified Valve Timing", SAE Technical Paper, No. 2000-01-2870.

- Kong, S. C. ve diğerleri, (2001), "Modeling and experiments of HCCI engine combustion using detailed chemical kinetics with multidimensional CFD, SAE Technical Paper, No. 2001-01-1026.
- Lavy, J. ve diğerleri, (2000), "Innovative Ultra-low NO_x Controlled Auto-Ignition Combustion Process for Gasoline Engines: The 4-Space Project, SAE Technical Paper, No. 2000-01-1837.
- Lavy, J. ve diğerleri, (2001), "Towards a Better Understanding of Controlled Auto-Ignition (CAI) Combustion Process From 2-Stroke Engine Results Analyses", SAE Technical Paper, No. 2001-01-1859.
- Law, D. ve diğerleri, (2000), "Controlled combustion in an IC-engine with a fully variable valve train", SAE Technical Paper, No. 2000-01-0251.
- Law, D. ve diğerleri, (2002), "On the mechanism of controlled auto ignition", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0421.
- Lee, D. ve diğerleri, (2000), "Chemical Kinetic Study of a Cetane Number Enhancing Additive for an LPG DI Diesel Engine", SAE Technical Paper, No. 2000-01-0193.
- Lee, J. H., Goto, S., Tsurushima, T., Miyamoto, T. ve Wakisaka, T., (2000), "Effects of injection conditions on mixture formation process in a premixed compression ignition engine", SAE Technical Paper, No. 2000-01-1831.
- Leppard, W. R., (1987), "The auto-ignition Chemistry of n-Butane: An Experimental Study", SAE Technical Paper, No. 872150.
- Li, H. ve diğerleri, (1995), "The Effects of Methanol and Ethanol on the Oxidation of a Primary Reference Fuel Blend in a Motored Engine", SAE Technical Paper, No. 950682.
- Li, J. ve diğerleri, (2001), "Research and development of controlled auto-ignition (CAI) combustion in a four-stroke multi-cylinder gasoline engine", SAE Technical Paper, No. 2001-01-3608.
- Li, T-M. ve diğerleri, (1986), "The Action of Ignition Improvers in Diesel Fuels", 21st Symposium on Combustion.
- Liotta, F. J., (1993), "A Peroxide Based Cetane Improvement Additive With Favorable Fuel Blending Properties", SAE Technical Paper, No. 932767.
- Ma, T., (2001), Method of Operating an Internal Combustion Engine, International Patent Application, WO 01/11233 A1.
- Ma, T. ve diğerleri, (2001), "Experimental investigation of controlled auto-ignition (CAI) combustion in a 4-stroke multi-cylinder gasoline engine and drive cycle simulations", Proceedings of the IFP International Congress on a New Generation of Engine Combustion Processes for the Future, pp. 115-126.
- Marriot, C. ve diğerleri, (2002a), "Experimental investigation of direct injection-gasoline for premixed compression ignited combustion phasing control", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0418.
- Marriot, C. ve diğerleri, (2002b), "Investigation of hydrocarbon emissions from a direct injection-gasoline premixed charge compression ignited engine", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0419.
- Martinez-Frias, J. ve diğerleri, (2000), "HCCI engine control by thermal management", SAE Technical Paper, No. 2000-01-2869.

- Mase, Y., Kawashina, J. I., Sato, T. ve Euguchi, M., (1998), "Nissan's new multivalve DI diesel engine series", SAE Technical Paper, No. 981039.
- Menrad, H. ve diğerleri, (1982), "Pre-Ignition and Knock Behavior of Alcohol Fuels", SAE Technical Paper, No. 821210.
- Mintz, M. ve diğerleri, (2002), "Hydrogen: On the Horizon or Just a Mirage?", SAE Technical Paper, No. 2002-01-1927.
- Miyamoto, T., Hayashi, A. K., Harada, A., Sasaki, S., Akagawa, H. ve Tsujimura, K., (1999), "A computational investigation of premixed lean diesel combustion – characteristics of fuel-air mixture formation, combustion and emissions", SAE Technical Paper, No. 1999-01-0229.
- Morimoto, S. ve diğerleri, (2001), "Operating characteristics of natural gas fueled homogeneous charge compression ignition engine (Performance Improvement Using EGR)", SAE Technical Paper, No. 2001-01-1034.
- Murase, E. ve diğerleri, (2002), "Ignition Timing Control of Homogeneous Charge Compression Ignition Engines by Pulsed Flame Jets veyahut Control of the start of HCCI combustion by pulsed flame jet", Comb. Sci. Technology, Vol. 174 veyahut SAE Technical Paper, No. 2002-01-2867.
- Najt, P. M. ve Foster, D. E., (1983), "Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion", SAE Technical Paper, No. 830264.
- Najt, P. M., (1987), "Evaluating Threshold Knock With a Semi-Empirical Model – Initial Results", SAE Technical Paper, No. 872149.
- Nakagome, K., Shimazaki, N., Niimura, K. ve Kobayashi, S., (1997), "Combustion and emission characteristics of premixed lean diesel combustion engine", SAE Technical Paper, No. 970898.
- Nandi, M. K. ve diğerleri, (1995), "Cetane Response of Di-tertiary-butyl Peroxide in Different Diesel Fuels", SAE Technical Paper, No. 952368.
- Nishijima, Y., Asaumi, Y. ve Aoyagi, Y., (2001), "Premixed lean diesel combustion (PREDIC) using impingement spray system", SAE Technical Paper, No. 2001-01-1892.
- Nishijima, Y., Asaumi, Y. ve Aoyagi, Y., (2002), "Impingement spray system with direct water injection for premixed lean diesel combustion control", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0109.
- Noda, T. ve diğerleri, (2001), "A Numerical Study to Control Combustion Duration of Hydrogen-Fueled HCCI by Using Multi-Zone Chemical Kinetics Simulation", SAE Technical Paper, No. 2001-01-0250.
- Noguchi, M. ve diğerleri, (1979), "A Study on Gasoline Engine Combustion by Observation of Intermediate Reactive Products During Combustion", SAE Technical Paper, No. 790840.
- Norton, P. ve diğerleri, (1998), "Emissions From Trucks Using Fischer-Tropsch Diesel Fuel", SAE Technical Paper, No. 982526.
- Oakley, A. ve diğerleri, (2001), "Dilution Effects on the Controlled Auto-Ignition (CAI) Combustion of Hydrocarbon and Alcohol Fuels", SAE Technical Paper, No. 2001-01-3606.
- Odaka, M., Suzuki, H., Koike, N. ve Ishii, H., (1999), "Search for optimizing control method of homogeneous charge diesel combustion", SAE Technical Paper, No. 1999-01-0184.

- Ogawa, H., Kimura, S., Koike, M. ve Enomoto, Y., (2000), "A study of heat rejection and combustion characteristics of a low-temperature and premixed combustion concept based on measurements of instantaneous heat flux in a direct-injection diesel engine", SAE Technical Paper, No. 2000-01-2792.
- Olsson, J. O. ve diğerleri, (2001a), "Closed-loop control of an HCCI engine", SAE Technical Paper, No. 2001-01-1031.
- Olsson, J. O. ve diğerleri, (2001b), "A Turbocharged Dual Fuel HCCI Engine", SAE Technical Paper, No. 2001-01-1896.
- Olsson, J. O. ve diğerleri, (2002), "Compression Ratio Influence on Maximum Load of a Natural Gas Fueled HCCI Engine", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0111.
- Onishi, S. ve diğerleri, (1979), "Active thermo-atmospheric combustion (ATAC) – a new combustion process for internal combustion engines", SAE Technical Paper, No. 790501.
- Owen, K. ve diğerleri, (1995), Automotive Fuels Reference Book, 2nd edition.
- Richter, M. ve diğerleri, (2000), "The influence of charge inhomogeneity on the HCCI combustion process", SAE Technical Paper, No. 2000-01-2868.
- Rickling, P. U. ve diğerleri, (2002), "The Effects of NO_x Addition on the auto-ignition Behavior of Natural Gas Under HCCI Conditions", SAE Technical Paper, No. 2002-01-1746.
- Ryan III, T. W. ve Callahan, T. J., (1996), "Homogeneous charge compression ignition of diesel fuel", SAE Technical Paper, No. 961160.
- Schwab, S. D. ve diğerleri, (1999), "The Effects of 2-Ethylhexyl Nitrate and Di-Tertiary-Butyl Peroxide on the Exhaust Emissions From a Heavy-Duty Diesel Engine", SAE Technical Paper, No. 1999-01-1478.
- Seko, T. ve diğerleri, (1998), "Methanol Lean Burn in an Auto-Ignition DI Engine", SAE Technical Paper, No. 980531.
- Shimazaki, N., Akagawa, H. ve Tsujimura, K., (1999), "An experimental study of premixed lean diesel combustion", SAE Technical Paper, No. 1999-01-0181.
- Shudo, T. ve diğerleri, (2002), "HCCI Combustion of Hydrogen, Carbon Monoxide and Dimethyl Ether", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0112.
- Sirman, M. B. ve diğerleri, (2000), "Emissions Comparison of Alternative Fuels in Advanced Automotive Diesel Engine", SAE Technical Paper, No. 2000-01-2048.
- Stanglmaier, R. H. ve Roberts, C. E., (1999), "Homogeneous charge compression ignition (HCCI): benefits, comprises, and future engine applications", SAE Technical Paper, No. 1999-01-3682.
- Stanglmaier, R. H. ve diğerleri, (2001), "HCCI Operation of a Dual-Fuel Natural Gas Engine for Improved Fuel Efficiency and Ultra-Low NO_x Emissions at Low to Moderate Engine Loads", SAE Technical Paper, No. 2001-01-1897.
- Stein, Y. ve diğerleri, (1999), "The auto-ignition Behavior of Surrogate Diesel Fuel Mixtures and the Chemical Effects of 2-Ethylhexyl Nitrate (EHN) Cetane Improver, SAE Technical Paper, No. 1999-01-1504.
- Stravinoha L. L. ve diğerleri, (2000), "Alternative Fuels: Gas To Liquids as Potential 21st Century Truck Fuels", SAE Technical Paper, No. 2000-01-3422.
- Suzuki, T., Kakegawa, T., Hikino, K. ve Obata, A., (1997b), "Development of Diesel Combustion for Commercial Vehicles", SAE Technical Paper, No. 972685.

- Suzuki, H., Koike, N. ve Odaka, M., (1998), "Combustion control method of homogeneous charge diesel engines", SAE Technical Paper, No. 980509.
- Swain, M. R. ve diğerleri, (1989), "Abnormal Combustion in a Methanol Fueled Engine", SAE Technical Engine, No.892162.
- Takeda, Y., Nakagome, K. ve Niimura, K., (1996), "Emission characteristics of premixed lean diesel combustion with extremely early staged fuel injection", SAE Technical Paper, No. 961163.
- Tang, X. ve diğerleri, (2002), "Ford P2000 Hydrogen Engine Dynamometer Development", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0242.
- Thring, R. H., (1989), "Homogeneous-charge compression ignition (HCCI) engines", SAE Technical Paper, No. 892068.
- Tsurushima, T., Miyamoto, T., Akagawa, H., Aoyagi, Y., Lee, J. H., Lee, D., Goto, S., Wakisaka, T., Ishiyama, T. ve Kawanabe, H., (2000), "Effects of initial in-cylinder flow field on mixture formation in a premixed compression ignition engine", SAE Technical Paper, No. 2000-01-0331.
- Tsurushima, T., Harada, A., Iwashiro, Y., Enomoto, Y., Asaumi, Y. ve Aoyagi, Y., (2001), "Thermodynamic characteristics of premixed compression ignition combustions", SAE Technical Paper, No. 2001-01-1891.
- Tsurushima, T., Kunishima, E., Asaumi, Y., Aoyagi, Y. ve Enomoto, Y., (2002), "The effect of knock on heat loss in homogeneous charge compression ignition engines", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0108.
- Verbeek, R. ve diğerleri, (1997), "Global Assesment of Dimethyl-Ether: Comparison With Other Fuels", SAE Technical Paper, No. 971607.
- Vertin, K. D. ve diğerleri, (1999), "Methylal and Methylal-Diesel Blended Fuels for Use in Compression-Ignition Engines", SAE Technical Paper, No. 1999-01-1508.
- Walter, B. ve Gatellier, B., (2002), "Development of the high power NADI concept using dual mode diesel combustion to achieve zero NOx and particulate emissions", SAE Technical Paper, No. 2002-01-1744.
- Watson, H. C. ve diğerleri, (2000), "The Systematic Evaluation of Twelve LP Gas Fuels for Emissions and Fuel Consumption", SAE Technical Paper, No. 2000-01-1867.
- Willand, J. ve diğerleri, (1998), "The knocking syndrome: its cure and potential", SAE Technical Paper, No. 982483.
- Yamamoto, S. ve diğerleri, (2002), "Feasibility study of two-stage hybrid combustion in gasoline direct injection engines", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0113.
- Yanagihara, H., (2001a), "Ignition timing control at Toyota "UNIBUS" combustion system", Proceedings of the IFP International Congress on a New Generation of Engine Combustion Processes for the Future, pp. 34-42.
- Yang, J. ve diğerleri, (2002), "Development of a gasoline engine system using HCCI technology – the concept and test results, SAE Technical Paper, No. 2002-01-2832.
- Yokota, H., Kudo, Y., Nakajima, H., Kakegawa, T. ve Suzuki, T., (1997), "A new concept for low emission diesel combustion", SAE Technical Paper, No. 970891.
- Zhao, H. ve diğerleri, (2001), "Understanding the effects of recycled burnt gases on the controlled autoignition (CAI) combustion in four-stroke gasoline engines", SAE Technical Paper, No. 2001-01-3607.

Zhao, H. ve diğeri, (2002), "Performance and analysis of a four-stroke multi-cylinder gasoline engine with CAI combustion", SAE Technical Paper, No. 2002-01-0420.

Zhao, F. F., Asmus, T. W., Assanis, D. N., Dec, J. E., Eng, J. A. ve Najt, P. M., (2003), Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines, Society of Automotive Engineers, 400 Commonwealth Drive / Warrendale / U.S.A.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 22.05.1975

Doğum yeri İstanbul

Lise 1990-1993 Özel Tercüman Lisesi

Lisans 1994-1999 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2001-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,
Enerji Makineleri Programı

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|------|
| SİMGE LİSTESİ | i |
| KISALTMA LİSTESİ | ii |
| ŞEKİL LİSTESİ | iv |
| ÇİZELGE LİSTESİ | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| ÖZET | vii |
| ABSTRACT | viii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. BENZİN YAKITLI HCCI MOTORLAR | 3 |
| 2.1 Genel Tanımlama | 3 |
| 2.2 HCCI Yanma Tarihçesinin İncelenmesi | 5 |
| 2.3 Benzinli HCCI Yanmasına Bakış | 8 |
| 2.3.1 Karışım Homojensizliğinin Etkisi | 9 |
| 2.3.2 Türbülansın Etkisi | 10 |
| 2.4 Benzinli HCCI Motorunun Gelişimi | 11 |
| 2.4.1 HCCI Motor Operasyonunun Gerekleri | 12 |
| 2.4.2 Seyreltim Stratejileri | 14 |
| 2.4.3 Sıkıştırma Oranı | 15 |
| 2.4.4 Yakıt Püskürtme Sistemi | 17 |
| 2.4.5 Kendi Kendine Tutuşma Zamanlaması Kontrolü | 18 |
| 2.4.6 HCCI Emisyonları ve Emisyon Kontrolü | 19 |
| 2.5 Gelecek Hedefleri | 20 |
| 3. DIESEL YAKITLI HCCI MOTORLAR | 22 |
| 3.1 Genel Tanımlama | 22 |
| 3.2 Ön Karışimli HCCI Operasyonu | 24 |
| 3.3 Erken Direkt Püskürtmeli HCCI Operasyonu | 27 |
| 3.3.1 New ACE Institute, Japonya | 28 |
| 3.3.2 Hino Motors, Ltd. | 37 |
| 3.3.3 Mitsubishi Motors Corporation | 37 |
| 3.3.4 Toyota Motor Corporation | 40 |
| 3.3.5 IFP (Institut Francais du Pétrole) | 42 |
| 3.4 Geç Direkt Püskürtmeli HCCI Operasyonu | 44 |
| 3.4.1 Nissan Motor Company | 44 |
| 3.5 HCCI Operasyonunun Kontrolü İçin Su Püskürtülmesi | 50 |
| 3.6 Sonuç Yorumları | 51 |
| 4. HCCI MOTORLAR İÇİN ALTERNATİF YAKITLAR VE YAKIT KATKI MADDELERİ | 55 |
| 4.1 Genel Tanımlama | 55 |
| 4.1.1 Potansiyel Alternatif Yakıtlar ve Yakıt Katkı Maddeleri | 57 |
| 4.1.2 Yakıtların Oktan ve Setan Sayıları | 58 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.2 | Katkısız Alternatif Yakıtlar..... | 60 |
| 4.2.1 | Doğal Gaz | 61 |
| 4.2.2 | LPG..... | 63 |
| 4.2.3 | Metanol ve Etanol..... | 64 |
| 4.2.4 | Hidrojen | 66 |
| 4.3 | Yakıt Karışımları ve Katkı Maddeleri..... | 67 |
| 4.3.1 | DME | 69 |
| 4.3.2 | DMM ve DEE | 71 |
| 4.3.3 | DTBP | 72 |
| 4.3.4 | 2-EHN..... | 73 |
| 4.3.5 | Fischer – Tropsch Diesel | 74 |
| 4.3.6 | Benzin ve Diesel Yakıt Karışımları..... | 75 |
| 4.4 | Yakıt Katkı Maddelerinin Kimyasal Kinetikleri..... | 76 |
| 4.5 | Gelecekteki Çalışmalar | 79 |
| 5. | HCCI OPERASYONUNUN KONTROLÜ VE ÇALIŞMA ARALIĞININ GENİŞLETİLMESİ..... | 81 |
| 5.1 | Genel Tanımlama | 81 |
| 5.2 | HCCI Operasyonunun Kontrolü ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi İçin Önemli Hususlar ve Kilit Parametreler..... | 83 |
| 5.2.1 | HCCI Operasyonunun Kontrolü İçin Motor Çalışma Karakteristikleri | 83 |
| 5.2.2 | HCCI Operasyonunun Kontrolü ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi İçin Kilit Nitelikteki Çalışma Parametreleri | 84 |
| 5.2.2.1 | Emme Havası Sıcaklığı..... | 86 |
| 5.2.2.2 | Isı değiştirici..... | 86 |
| 5.2.2.3 | Sıkıştırma Oranı | 87 |
| 5.2.2.4 | Egzost Gazının Tekrar Sirkülasyonunun (EGR) ve Art Gazın Etkileri..... | 87 |
| 5.2.2.5 | Su Püskürtülmesi | 90 |
| 5.2.2.6 | Doldurma Basıncı..... | 91 |
| 5.2.2.7 | Yakıt Püskürtme Stratejileri ve Silindir İçindeki Yakıt Dağılımının Etkisi | 91 |
| 5.2.2.8 | Yakıtların, Katkı Maddelerinin ve Yakıt Modifikasyonlarının Etkisi..... | 96 |
| 5.2.2.9 | Motor Hızı..... | 99 |
| 5.2.3 | HCCI Operasyonlarının Kontrol Edilebilmesi İçin İleri Sürülen Diğer Yaklaşımlar | 100 |
| 5.2.4 | Çalışma Aralığının Genişletilmesi ve Çift-Modlu Operasyonlar..... | 101 |
| 5.2.5 | CO ve HC Emisyonlarının Kontrolü | 103 |
| 5.2.6 | Sistemli Kapalı-Döngü Kontrolü İçin Sensör Gelişimi | 104 |
| 5.3 | HCCI Operasyonunun Kontrolü ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi İçin Bazı Yaklaşımlar | 104 |
| 5.3.1 | MK (Modulated Kinetics)..... | 105 |
| 5.3.2 | UNIBUS (UNIFORM BULKY combustion System) | 106 |
| 5.3.3 | Bölünmüş (Çok Kademeli Püskürtme) Püskürtme | 106 |
| 5.3.4 | Değişken Supap Hareketi ile Birlikte Direkt Benzin Püskürtmesinin Uygulanması | 107 |
| 5.3.5 | İki Bölge (Fakir Karışimli SI Yanması / Homojen Yanma) Hibrid Yanma..... | 107 |
| 5.4 | Gelecek Hedefleri..... | 108 |
| 6. | SONUÇLAR VE YORUMLAR | 110 |
| | KAYNAKLAR..... | 112 |
| | ÖZGEÇMİŞ | 121 |

SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| NO_x | Azotoksit |
| CO | Karbonmonoksit |
| CO_2 | Karbondioksit |
| HC | Hidrokarbon |
| λ | Hava fazlalık katsayısı |
| $\phi = \lambda^{-1}$ | Yakıt tedarığı derecesi, yakıt/hava denklik oranı, yakıt fazlalık katsayısı |
| \varnothing | Piston çapı, enjektör meme delik çapı |
| ϵ | Sıkıştırma oranı |
| θ_{inj} | Püskürtme zamanı |
| P_{inj} | Püskürtme basıncı |
| Q_f | Bir çevrimde püskürtülen yakıt miktarı (hacmi) |
| CH_4 | Metan |
| C_2H_6 | Etan |
| C_3H_8 | Propan |
| C_4H_{10} | Bütan |
| C_4H_8 | Bütilen |
| H_2 | Hidrojen |
| PO_x | Kısmi oksidasyon |
| N_2 | Azot |
| O_2 | Oksijen |
| H_2O | Buhar, su |
| CH_3OH | Metanol |
| CH_3OCH_3 | DME |
| $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | Etanol |
| $\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$ | DEE |
| $(\text{CH}_3)_3\text{COOC}(\text{CH}_3)_3$ | DTBP |
| $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ | Aseton |
| $\text{C}_8\text{H}_{17}\text{ONO}_2$ | 2-EHN, ION |
| HNO_2 | Nitrik asit |
| $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{OCH}_3$ | DMM |
| F – T diesel | Fischer – Tropsch diesel |

KISALTMA LİSTESİ

| | |
|------------|---|
| AKI | Vuruntu Yapmama İndeksi (Antiknock Index) AKI = (RON + MON) / 2 |
| ASTM | Amerikan Standart Test Metotları (American Standart Testing Methods) |
| ATAC | Aktif Thermo-Atmosferik Yanma (Active Thermo-Atmospheric Combustion) |
| ATDC | Üst Ölü Noktadan Sonra (After Top Dead Center) |
| BCUP | Tertiary Butilcumil Peroksit |
| BEN | n-Butoksietil Nitrat |
| BMEP | Fren Ortalama Efektif Basınç, Ortalama Efektif Basınç |
| CFD | Hesaba Dayanan Akış Dinamiği (Computational Fluid Dynamics) |
| CFR | Cooperative Fuels Research (motoru) |
| CN | Setan Sayısı (Cetan Number) |
| CNG | Sıkıştırılmış Doğal Gaz |
| DEE | Dietil Eter |
| DHBP | Tertiary Butilperoksi Heksan |
| DI | Direkt Püskürtme |
| DME | Dimetil Eter |
| DMM | Dimetoksi Metan, Metilal |
| DTAP | Di-Tertiary Amil Peroksit |
| DTBP | Di-Tertiary Butil Peroksit |
| EGR | Egzost Gazı Tekrar Sirkülasyonu |
| 2-EHN, ION | 2-Etilheksil Nitrat, İzooktil Nitrat |
| FTP | Federal Test Procedure |
| FVVT | Etkin Değişken Supap Zamanlaması (Fully Variable Valve Timing) |
| GDI | Direkt Benzin Püskürtme |
| GTL | Gazdan Sıvıya Dönüştürme (Gas to Liquid) |
| HCCI | Homojen Dolguyu Sıkıştırarak Tutuşturma (Homogeneous Charge Compression Ignition) |
| HCSI | Homojen Dolguyu Buji İle Tutuşturma (Homogeneous Charge Spark Ignition) |
| IFP | Institut Francais du Petrole |
| IMEP | İndike Ortalama Efektif Basınç |
| IPN | İzopropil Nitrat |
| IC | İçten Yanmalı (motorlar) |
| ISFC | İndike Özgül Yakıt Sarfiyatı |
| KMA, CA | Krank Mili Açısı, Crank Angle |
| LHV | Alt Isıl Değer (Lower Heating Value) |
| LNG | Sıvılaştırılmış Doğal Gaz |
| LPG | Sıvılaştırılmış Petrol Gazı |
| MK | Modulated Kinetics |
| MON | Motor Oktan Sayısı (Motor Octane Number) |
| MRG | Metanol Türevli Gaz (Methanol Reformed Gas), %67 H ₂ + %33 CO |
| MTBE | Metil Tertiary Butil Eter |
| NADI™ | Dar Açılı Direkt Püskürtme (Narrow Angle Direct Injection) |
| NEDC | New European Drive Cycle |
| NiCE | Nippon Clean Engine Research Institute |
| ÖÜÖN, BTDC | Üst Ölü Noktadan Önce (Before Top Dead Center) |

| | |
|--------------|---|
| PFI | Manifolda Yakıt Püskürtme |
| PLIF | Planar Laser-Induced Fluorescence |
| PM | Partikül Maddesi, İS, Duman Emisyonu, Partikül (Particulate Matter) |
| ppm | Milyon Partikül Miktarı (parts per million) |
| PREDIC | Ön karışımli fakir diesel yanması (PREmixed lean Diesel Combustion) |
| PRF | Ana Referans Yakıtları (Primary Reference Fuels) |
| RPM | Dakikadaki Devir Sayısı (Rotation per Minute) |
| ROHR | Isının Açığa Çıkış Hızı (Rate of Heat Release) |
| RON | Araştırma Oktan Sayısı (Research Octane Number) |
| SCCI | Kademeli Dolguyu Sıkıştırarak Tutuşturma (Stratified Charge Compression Ignition) |
| SCSI | Kademeli Dolguyu Buji İle Tutuşturma (Stratified Charge Spark Ignition) |
| SI | Buji ile Ateşleme |
| SOI | Püskürtme Başlangıcı (Start of Injection) |
| TBHP | Tertiary Butil Hidroperoksit |
| THC | Toplam HC miktarı |
| T / O, S / R | Türbülans Oranı, Swirl Ratio |
| UHC | Yanmamış HC miktarı |
| ULEV | Ultra Low Emission Vehicle Standarts |
| UNIBUS | UNIform BUIky combustion System |
| ÜÖN, TDC | Üst Ölü Nokta (Top Dead Center) |
| VVA | Değişken Supap Hareketi (Variable Valf Actuation) |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 3.1 | Klasik diesel operasyonunda ve kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunda yakıt hüzmesinin lokasyonu (durumu)..... | 29 |
| Şekil 3.2 | Merkez püskürtmeli PREDIC operasyonunda yakıt hüzmesinin lokasyonu (durumu) | 29 |
| Şekil 3.3 | Kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunda motor performansı ve emisyonları.. | 31 |
| Şekil 3.4 | Kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunda ısı açığa çıkış hızı | 31 |
| Şekil 3.5 | Motor performansı ve emisyon kıyaslaması (Kenar püskürtmeli PREDIC için) .. | 32 |
| Şekil 3.6 | Isı açığa çıkış hızının kıyaslanması (Kenar püskürtmeli PREDIC için) | 32 |
| Şekil 3.7 | Klasik diesel operasyonunun ve kenar püskürtmeli PREDIC operasyonunun yanma fotoğrafları (Ne = 1000 rpm) | 33 |
| Şekil 3.8 | Merkez püskürtmeli PREDIC operasyonunun motor performansı ve emisyonları | 34 |
| Şekil 3.9 | Merkez püskürtmeli PREDIC operasyonunun ısı açığa çıkış hızı..... | 35 |
| Şekil 3.10 | Çarpışan hüzmeli memenin hüzmeye karakteristikleri (1 çift çarptırılmalı delik).... | 38 |
| Şekil 3.11 | Motor testlerindeki çarpışan hüzmeli memenin yapısı (5 çift çarptırılmalı delik) .. | 39 |
| Şekil 3.12 | Çarpışan hüzmeli memenin yakıt hüzmesi görünümü | 39 |
| Şekil 3.13 | NADI TM (Narrow Angle Direct Injection) yanma sisteminin genel görünümü | 42 |
| Şekil 3.14 | Isı açığa çıkış hızının ve yanma fotoğrafının kıyaslanması..... | 45 |
| Şekil 3.15 | Birinci jenerasyon ve hedeflenen MK konsept bölgesi (YD25DDT)..... | 46 |
| Şekil 3.16 | Her bir yanma faktörünün egzost emisyonlarına ve termik verime etkisi | 47 |
| Şekil 3.17 | MK yanma bölgesini genişletme yaklaşımı..... | 49 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Çizelge 3.1 Motor özellikleri ve test koşulları | 30 |
| Çizelge 3.2 Test motorunun özellikleri..... | 45 |
| Çizelge 3.3 Test motorunun özellikleri..... | 48 |
| Çizelge 4.1 Katkısız alternatif yakıtlar için yakıt özellikleri | 61 |
| Çizelge 4.2 Yakıt katkı maddesi özellikleri | 69 |

ÖNSÖZ

Hazırladığım tez çalışmasında, homojen karışimli sıkıştırma yoluyla çalışan içten yanmalı motorları inceledim. Bu çalışmam sırasında bana yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Orhan DENİZ' e teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Homojen karışımli (dolgulu) sıkıştırma tutuşmalı (genelde HCCI olarak bilinen) yanma prosesi, NO_x ve partikül emisyonlarını önemli derecede azaltma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte yüksek termik verim ve yakıtların geniş bir yelpazesinin kullanılabilirliği söz konusudur. Bu özellikler HCCI motorlarını merak edilen bir teknoloji haline getirmektedir. Bu teknoloji, görünüşte diesel vari yakıt verimi ve çok düşük emisyonları sağlayabilir ve böylece düşük sıcaklık ard işlem sistemlerine ihtiyaç duyulmadan emisyon kriterlerinin yerine getirilmesini mümkün kılabilir.

Son yıllarda bu teknolojinin araştırılması ve geliştirilmesi hususunda büyük ilerlemeler kaydedildi. Bu tez HCCI teknolojisinin ulaştığı en son nokta hakkında temel bir bilgi vererek gelecek için bir perspektif oluşturmaktadır. Bu tez, Benzin Yakıtlı HCCI Motorlar, Diesel Yakıtlı HCCI Motorlar, HCCI Motorlar İçin Alternatif Yakıtlar ve Yakıt Katkı Maddeleri ve son olarak HCCI Operasyonunun Kontrolü ve Çalışma Aralığının Genişletilmesi olmak üzere 4 ana başlık altında toparlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Homojen dolgu, sıkıştırma tutuşması, değişken supap zamanlaması, doldurma basıncı, değişken sıkıştırma oranı

ABSTRACT

The homogeneous charge, compression-ignition (HCCI) combustion process has the potential to significantly reduce NO_x and particulate emissions, while achieving high thermal efficiency and the capability of operating with a wide variety of fuels. This makes HCCI engine an attractive technology that can ostensibly provide diesel-like fuel efficiency and very low emissions which may allow emissions compliance to occur without relying on lean-aftertreatment systems.

A profound increase in the level of research and development of this technology has occurred in the last decade. As this thesis giving a basic introduction to the state-of-the-art of HCCI technology, provides a perspective for the future. This thesis is formed of 4 main underlying topics including Gasoline-Fueled HCCI Engines, Diesel-Fueled HCCI Engines, Alternative Fuels and Fuel Additives for HCCI Engines, and finally HCCI Control and Operating Range Extension.

Keywords: Homogeneous charge, compression ignition, variable valve timing, boost pressure, variable compression ratio

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HOMOJEN KARIŞIMLI
İÇTEN YANMALI MOTORLAR**

Makine Mühendisi Cemal Murat ÖZDEN

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makineleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan DENİZ

İSTANBUL, 2005