



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

## Isı Depolamalı Bir LPG Buharlaştırıcı/Regülatörünün Deneysel Analizi

Adem UĞURLU <sup>a,\*</sup>, Metin GÜMÜŞ <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Mekanik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: adem.ugurlu@klu.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışmada, taşıt LPG dönüşüm regülatörlerindeki soğuk çalıştırma probleminin çözümü için, faz değiştiren malzeme (PCM) kullanımıyla ısı enerjisi depolayabilen bir regülatör tasarlanmıştır. PCM'li regülatörün taşıt motoru üzerinde, rölanti çalışma koşullarındaki ısıl davranışı incelenmiştir. PCM'li regülatörün kullanılması ile oluşan egzoz emisyonları (HC, CO) benzinli çalışmadaki emisyonlar ile karşılaştırılmıştır. PCM'siz regülatör 3 saatte LPG ile çalışma sıcaklığının altına düşerken, aynı koşullarda, tasarlanan PCM'li regülatör 15 saat sonunda motoru LPG'de çalıştırabilmektedir. Motorun 12 saat soğumasından sonra, direkt LPG yakıtı ile çalıştırılması ile benzine nazaran HC emisyonlarında %17,32 ve CO emisyonlarında %28,71 düşüş elde edilmiştir. Bu regülatörün kullanımıyla LPG'den beklenen yakıt ekonomisi artırılabilir ve çevreye yayılan kirletici emisyonlar iyileştirilebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** LPG, Soğuk çalıştırma, PCM, Egzoz emisyonları

## Experimental Analysis of an LPG Evaporator/Regulator with Heat Storage

### ABSTRACT

In this study, to solve the cold start problem of LPG conversion regulators in vehicles, a regulator that can store thermal energy is designed by the use of phase change material (PCM). The thermal behavior of the regulator with PCM is tested at idle operating conditions on the engine. The exhaust emissions (HC, CO) output by the use of regulator with PCM are compared to the emissions on the gasoline mode. Regulator with PCM could start the engine with LPG after the 15 hours cooling duration of the engine, while the temperature of the regulator without PCM drops below the working temperature of engine with LPG in 3 hours under the same conditions. By means of the engine start directly with LPG, it is achieved that HC and CO emissions decrease about 17.32 % and 28.71 %, respectively after the 12 hours cooling duration of the engine. By the use of this regulator, the fuel economy expected from LPG can be enhanced and the pollutants emitted to the environment diminished.

**Keywords:** LPG, Cold start, PCM, Exhaust emissions

## I. GİRİŞ

**A**rtan dünya nüfusu, ekonomik büyüme, kişi başına enerji tüketiminin artması, yaşam tarzlarının değişmesi ve insanların büyük şehir merkezlerinde toplanması gibi etkenler dünyada kullanılan enerji miktarının her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Enerji tüketimindeki bu artış başlıca iki problemi doğurmuştur. Bunlar; yoğun bir enerji kullanımıyla oluşan çevre kirliliği ve enerji kaynaklarının sınırlılığından dolayı artan enerji fiyatlarıdır [1].

Dünyada artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi ve içten yanmalı motorlardan kaynaklanan hava kirliliğinin azaltılabilmesi için alternatif, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları araştırılmaktadır. Sıvılaştırılmış petrol gazı (Liquefied Petroleum Gas: LPG) içten yanmalı motorlarda yakıt ekonomisi sağlamak ve egzoz emisyon değerlerini azaltmak için kullanılan alternatif yakıtlardan biridir. LPG'nin alternatif bir yakıt olarak taşıtlarda kullanılması son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Yine LPG yakıtını kullanan araçların emisyonlarını konu alan birçok araştırma literatürde yerini almaktadır. Bu araştırmalardan elde edilen sonuçlarda genel olarak; LPG ile çalışan taşıtların emisyon değerleri, benzinle çalışan eşdeğerlerindeki kadar düşük olduğu bulunmuştur. Bunun temel nedeni, benzinle kıyaslandığında LPG'nin hidrojen/ karbon oranının yüksek olmasıdır [2].

Günümüz taşıt motorlarında LPG silindir içerisine gaz fazında havayla karıştırılarak gönderilmektedir. Taşıtlarda LPG'nin gaz fazında kullanılmasının en önemli dezavantajlarından birisi, soğuk çalışma koşullarında bir müddet benzin yakıtıyla çalıştırılması gerekliliğidir. LPG tank içerisinde basınç altında sıvı halde bulunmaktadır. LPG'nin basıncını düşürmek ve gaz haline geçirmek için motorun soğutma suyu sıcaklığıyla ısıtılan bir regülatör kullanılmaktadır. Ancak ilk çalıştırma durumunda motor soğutma suyu sıcaklığı regülatörden geçen LPG'yi buharlaştırmak için yeterli olmamaktadır. Bu yüzden taşıt yeterli sıcaklığa ulaşana kadar benzinde çalıştırılmaktadır. Böylece LPG'den beklenen yakıt ekonomisi tam olarak sağlanamamakta ve çevreye yayılan kirletici emisyonlar artmaktadır [3].

Öte yandan içten yanmalı motorların soğuk havalarda çalıştırılmasında, yakıt tüketiminin ve zararlı egzoz emisyonlarının artması [4] ile motorun ihtiyaca geç cevap vermesi [5] gibi çok önemli problemler ortaya çıkmaktadır. Özellikle soğuk iklimlerin yaşandığı bölgelerde, bu problemlerin çözümü için yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir [4]. Isı depolama sistemlerinin taşıt motorlarına uygulanması, soğuk çalıştırma (cold start) durumlarında karşılaşılan bir çok olumsuz sonuçları ortadan kaldırmaktadır [4-6]. Özellikle ilk çevrimlerde başarılı bir soğuk çalıştırma hidrokarbon (HC) emisyonlarını azaltmak için çok önemlidir [7, 8]. Toplam HC emisyonlarının %80'den fazlası ile karbon monoksit (CO) emisyonlarının %50'den fazlası motorun çalışmasından itibaren ilk iki dakika içerisinde oluşmakta ve egzozdan dışarı atılmaktadır [7-9]. Bu sebeple 2000 yılında hazırlanan EURO III Avrupa emisyon normundan itibaren taşıtların soğuk çalıştırma koşullarında yaydıkları emisyonlar sınırlandırılmaya tabi tutulmaktadır [8].

Literatürde, aynı araç üzerinde LPG yakıtı ile benzinin kullanılması sonucunda oluşan egzoz emisyonlarının karşılaştırılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada, Avrupa sürüş çevrimine (European Driving Cycle – EDC) göre, 25°C'de LPG ile çalıştırılan bir aracın emisyon oranları benzine nazaran çok daha düşük olduğu belirtilmiştir [10]. Hidrokarbon emisyonları %40, karbon monoksit emisyonları %60 ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) oranları da nispeten daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçların doğruluğu, benzer çalışmalar ile de onaylanmıştır [11, 12]. Diğer bir çalışmada ise, elde edilen verilere dayanarak LPG yakıtlarının benzinle karşılaştırıldığında daha düşük azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonlarına sahip olduğu belirtilmiştir [13]. Literatür incelendiğinde, buji

ateşlemeli motorlardaki soğuk çalıştırma problemi hakkında yapılan çalışmaların son yıllarda giderek artış gösterdiği görülmektedir. Yapılan bir çalışmada, buji ateşlemeli bir motor ikinci nesil bir LPG dönüşüm sistemi ile donatılıp yeni Avrupa sürüş çevrimine (New European Driving Cycle – NEDC) göre test edilmiştir. Soğuk çalıştırmada, şehir içi sürüşteki (Urban Driving Cycle – UDC) 390 saniyeye kadar ve şehirlerarası sürüşteki (Extra Urban Driving Cycle – EUDC) 400 saniyeye kadar elde edilen egzoz emisyonları benzin ve LPG için karşılaştırılmıştır. Soğuk çalışma koşullarında LPG yakıtı ile çalışmada tüm emisyonlar düşük çıkmıştır. CO ve HC emisyonlarının LPG’de beklenenden yüksek çıkması kullanılan ikinci nesil LPG dönüşüm sisteminde doğru hava/yakıt karışımı oluşturmanın zorluğundan kaynaklanmaktadır [14]. Standart bir üç yollu katalizörün kullanıldığı diğer bir çalışmada, farklı tiplerdeki buji ateşlemeli motorlar, NEDC tabanlı soğuk çalıştırma aşamasında, toplam HC emisyonlarının %80’ine sahip olduğu görülmüştür [15]. Diğer bazı çalışmalarda ise, HC ve CO emisyonlarının %50-80’inin soğuk çalıştırma esnasında oluştuğu ortaya konulmaktadır [16, 17].

Faz değiştiren malzemelerin (Phase Change Material: PCM) ısı depolama sistemi olarak taşıtlarda kullanılmasıyla alakalı literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Gümüş [19], yapmış olduğu çalışmada motorun soğuk çalıştırmada kolayca ilk harekete başlayabilmesi için PCM’li bir ısı depolama sistemini motorun ön ısıtılmasında kullanmıştır. Böylece motorun soğukta çalıştırma emisyonları, yakıt tüketimi ve aşınma zararları azaltılmıştır. Diğer bir çalışmada Korin ve diğ. [20] PCM’li bir ısı depolamalı katalitik konvertör tasarlayarak test etmiştir. PCM sayesinde depolanan ısı ile katalitik konvertörün ön ısıtılması sağlanmış böylece soğukta çalıştırma durumunda konvertörün zararlı egzoz gazlarını zararsız hale getirme verimi iyileştirilmiştir. Javani ve diğ. [21] ise PCM’i bir elektrikli taşıt bataryasının daha düzgün sıcaklık dağılımını sağlamak için kullanmışlardır. Ayrıca Ahmed ve diğ. [22] de PCM kullanarak soğutmalı bir kamyon kasasının izolasyonunu iyileştirmişlerdir. Kullanılan PCM ile dışarıdan giren ısı miktarı azaltılmış, böylece soğutulan alan sıcaklığı daha verimli bir şekilde istenilen seviyede tutulabilmiştir.

Literatürden farklı olarak bu çalışmada, LPG yakıtı kullanabilecek şekilde dönüşümü yapılmış bir taşıt motorundaki soğuk çalıştırma probleminin çözümü için, PCM kullanımıyla ısı enerjisi depolayabilen bir LPG regülatörü tasarlanmıştır. Depolanan bu ısı enerjisi ile motorun soğuk çalıştırmada LPG yakıtını kullanarak ilk çalışmaya başlatılması amaçlanmıştır. Böylece, yukarıda verilen literatür çalışması ışığında benzine nazaran daha ekonomik ve çevreci bir yakıt olan LPG ile motorun çalıştırılması sayesinde özellikle soğuk çalıştırma koşullarında daha da artan yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının düşürülmesi planlanmıştır. Önerilen sistemin uygulanabilir olup olmadığının tespiti için deneyler yapılmıştır. Öncelikle PCM’li regülatörün taşıt motoru üzerinde, rölanti çalışma koşullarındaki ısıl davranışı incelenmiştir. Ayrıca PCM’li regülatörün kullanılması ile motorun LPG’de çalıştırılması sonucu oluşan egzoz emisyonları (HC, CO) benzinli çalışmadaki emisyonlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler yorumlanarak sistemin uygulanabilirliği üzerine çıkarımlarda bulunulmuş ve sonraki çalışmalar için öneriler sıralanmıştır.

## II. MALZEME VE YÖNTEM

### *A. DENEY TAŞITI VE MOTORUNUN ÖZELLİKLERİ*

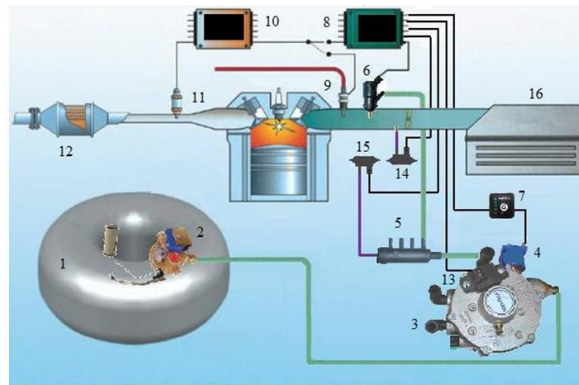
Deneylerde 2000 model Renault Clio 1,4i RTA markalı taşıt kullanılmıştır. Deney taşıtının ve taşıt üzerinde bulunan motorun teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deney taşıtı ve motorunun teknik özellikleri

<b>Marka ve model</b>	RENAULT CLIO RTA 1,4i 2000 Model
<b>Net ağırlık (kg)</b>	960
<b>Boyutlar (boy/en/yükseklik) (mm)</b>	3773/1639/1428
<b>Aktarma</b>	Önden çekişli
<b>Yakıt deposu hacmi (dm<sup>3</sup>)</b>	50
<b>Motor tipi</b>	Üstten tek eksantrikli, 8 valfli
<b>Ateşleme sırası</b>	1-3-4-2
<b>Silindir çapı (mm)</b>	75,8
<b>Silindir stroku (mm)</b>	77
<b>Piston süpürme hacmi (cm<sup>3</sup>)</b>	1390
<b>Sıkıştırma oranı</b>	9,5
<b>Soğutma sistemi</b>	Su soğutmalı
<b>Maksimum motor devri (1/min)</b>	5950
<b>Maksimum motor gücü (kW)</b>	55 (5500 1/min)
<b>Maksimum motor momenti (Nm)</b>	114 (4250 1/min)
<b>Yakıt enjeksiyon sistemi</b>	Elektronik kontrollü sıralı enjeksiyonlu
<b>Ortalama yakıt tüketimi (dm<sup>3</sup>/100 km)</b>	7,1

### B. ÇALIŞMADA KULLANILAN SIRALI ENJEKSİYON SİSTEMİ

Çalışmada, Üçyıldız Otomotiv firmasının üretmekte olduğu Voltran marka sıralı gaz enjeksiyon sistemi kullanılmıştır (Şekil 1). Sistem, LPG'yi sıvı halden gaz haline dönüştürmekte ve enjektörler vasıtasıyla emme manifolduna aktarmaktadır. Sistemdeki gaz enjekte etme sırası ve zamanlaması, elektronik kontrol ünitesi (EKÜ) tarafından kumanda edilmektedir. Gaz püskürtme zamanlaması aracın orijinal kontrol ünitesinin benzin enjeksiyon zamanlamasından faydalanılarak belirlenmektedir [3].



1. LPG tankı, 2. Multiyalı, 3. Regülatör, 4. Elektrovalf, 5. LPG enjeksiyon hattı, 6. LPG enjektörü, 7. Yakıt seçme anahtarı, 8. LPG EKÜ'sü, 9. Benzin enjektörü, 10. Benzin EKÜ'sü, 11. Lambda sensörü, 12. Katalitik konvertör, 13. Sıcaklık sensörü, 14. Vakum sensörü, 15. Basınç sensörü, 16. Hava filtresi

**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan LPG sistemi

### C. DENEYLERDE KULLANILAN YAKITLARIN ÖZELLİKLERİ

Deneylerde kullanılan benzin ile %50 propan ve %50 bütan karışımından oluşan LPG'nin özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

**Tablo 2.** Propan, bütan ve benzinin bazı özellikleri

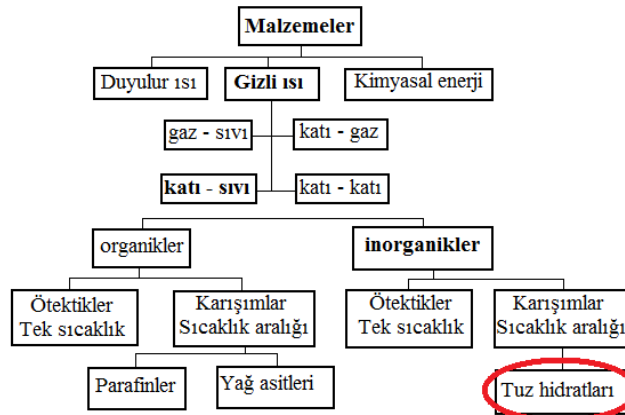
Özellikler	Propan	Bütan	Benzin
Kimyasal formül	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>6,9</sub> H <sub>14,6</sub>
15°C'de hacimsel kütle (kg/ dm <sup>3</sup> )	0,508	0,584	0,73-0,78
37,8°C'de buhar basıncı (bar)	12,1	2,6	0,5 – 0,9
Kaynama sıcaklığı (°C)	-42	-0,5	30 - 225
R.O.N.	111	103	96 – 98
M.O.N.	97	89	85 – 87
Alt ısıl değer (MJ/ kg)	46,1	45,5	44,0
Alt ısıl değer (MJ/ dm <sup>3</sup> )	23,4	26,5	32,3
Sıvı fazın özgül ısısı (kJ/ kg°C)	1366	1276	-
Teorik eşdeğerlik katsayısı	1,38	1,22	1

#### D. SEÇİLEN PCM'İN ÖZELLİKLERİ

Çalışmada faz değiştiren malzeme olarak yüksek erime gizli ısısının yanı sıra bol ve ucuz olması nedeniyle sodyum fosfat (Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>12H<sub>2</sub>O) tercih edilmiştir (Şekil 2). Malzemenin çalışma sıcaklık aralığı LPG regülatörü için uygundur. Seçilen PCM, motorun soğutma suyu ısısını üzerinde depolayacak ve bu ısı ile soğuma esnasında regülatörü uzun bir süre sıcak tutacak özelliklere sahiptir. Şekil 3'te, ısı enerjisi depolama amacıyla kullanılan malzemeler gruplanmış ve çalışmada kullanılan PCM'in grubu işaretlenmiştir.



**Şekil 2.** Çalışmada kullanılan faz değiştiren malzeme



**Şekil 3.** Seçilen PCM'in yer aldığı malzeme grubu

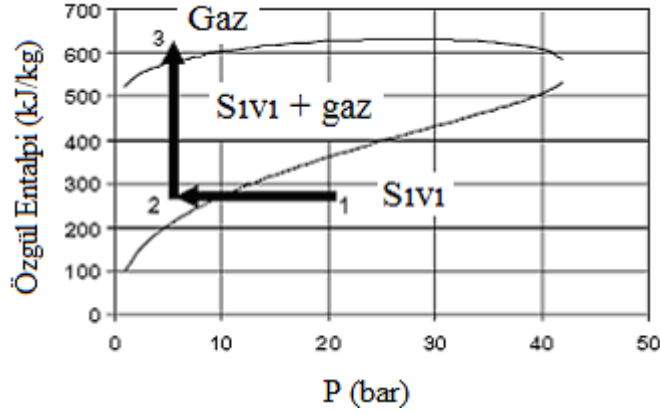
Malzeme seçiminde değerlendirilen faz değiştiren malzemeler Tablo 3'te yer almaktadır [4, 10, 18]. Diğer PCM'ler ile karşılaştırıldığında sodyum fosfat; erime sıcaklığının çalışmaya uygunluğu, erime gizli ısısının ve yoğunluğunun yüksekliği ile öne çıkmaktadır. Çalışmada sodyum fosfatın tercih edilmesindeki nedenlerden biri de bu kimyasal malzemenin diğerlerine nazaran ucuz ve kolay bir şekilde bulunabilir olmasıdır.

**Tablo 3.** Sodyum fosfat ve diğer bazı PCM'lerin teknik özellikleri

Malzeme	Erime sıcaklığı (°C)	Erime gizli ısısı (kJ/kg)	Isı iletkenliği (W/mK)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Kalsiyum Klorid Heksahidrat (CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	29	187.5	0.538	1560
Lityum Nitrat Trihidrat (LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O)	30	-	-	296
Sodyum Karbonat Dodekahidrat (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O)	32-36	246.5	-	1442
Sodyum Sülfat Dekahidrat (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O)	32.4	254	0.544	1485
Sodyum Fosfat Dibazik Dodekahidrat (Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O)	36	265	-	1522
Çinko Nitrat Heksahidrat (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	36	147	0,464	147
Baryum Hidroksit Oktahidrat (Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O)	48	265.7	0,653	1937
Sodyum Hidroksit (NaOH)	64.3	227.6	-	1690

### E. ISI DEPOLAMALI REGÜLATÖR SİSTEMİNİN TASARIMI

Tasarlanan ısı depolamalı regülatör sistemi, ticari olarak kullanılan bir sıralı sistem regülatörünün dış yüzeyine PCM'in temas edebilmesi için bir muhafaza yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Kullanılan regülatör, Üçyıldız Otomotiv firmasının üretmekte olduğu Voltran markalı sıralı sistem LPG regülatörüdür. Regülatörün sıvı haldeki LPG'yi buharlaştırma ve basıncını düşürme fonksiyonu Şekil 4'te görülmektedir [2]. Regülatöre giriş yapan LPG'nin daha geniş bir alana girmesi basıncını düşürmekte ve ıslak bir karışım oluşmaktadır (1-2 numaralı süreç). Böylece motor soğutma suyunun verdiği ısıyla, LPG tam olarak buharlaştırılmış olmaktadır (2-3 numaralı süreç).



Şekil 4. Regülatörün basınç düşürücü ve buharlaştırıcı özelliği

Regülatör çıkışındaki gazın sıcaklığı, regülatör kanallarından geçen motor soğutma suyunun sahip olduğu ısı enerjisinin bir fonksiyonudur. Regülatör çıkışındaki LPG, ıslak (gaz + sıvı) bir karışım değil, tam olarak buharlaşmış haldedir. Karışımın tam buharlaşmaması motorun silkelemesine ve bir müddet sonra stop etmesine neden olmaktadır. Regülatörün girişindeki LPG basıncı ve sıcaklığı büyük oranda sabittir. Tanktaki LPG'nin tamamen bitmesi sonucunda basıncın düşmesi ile araç otomatik olarak benzinde kullanıma geçmektedir [2, 3].

Regülatörün çevresine yerleştirilen polikarbonat muhafaza sert ve saydam bir yapıdadır. Muhafaza ile regülatörün dışarıda kalan parçaları (solenoid valf, su giriş-çıkış ve LPG giriş-çıkış boruları) arasındaki sızdırmazlığın sağlanabilmesi için yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Sistemdeki ısı kayıplarını önlemek amacıyla, dış yüzeyin ısı yalıtımı sağlanmıştır.

Seçilen faz değıştiren malzeme, dışarıda ısıtılarak muhafaza içerisine sıvı halde doldurulmuş ve kapağı kapatılıp izolasyonu sağlandıktan sonra, testlere başlanmak üzere soğutulmaya bırakılmıştır. Sistemde kullanılan toplam PCM miktarı: 1,2 kg, bu miktardaki malzemenin depolayabileceği ısı miktarı: 318 kJ'dür. Isı depolamalı regülatör sisteminin dış ölçüleri (çap x yükseklik): 132,5 x 100 mm'dir.

#### F. ISI DEPOLAMALI REGÜLATÖR SİSTEMİNİN YERLEŞİMİ

Isı depolama sisteminin montajında, LPG dönüşüm sisteminin mevcut durumuna müdahale edilmemiştir. Polikarbonat muhafaza içerisine yerleştirilen regülatörün su giriş-çıkış ve gaz giriş-çıkışları aynı yerlere bağlanmıştır. Bilindiği gibi, regülatörlerin motor soğutma sistemine bağlantıları, motorda termostat kapalıyken dahi sıcak suyun bulunduğu kalorifere giden hortumlardan yapılmaktadır. Bu hortumlar kesilerek, bir t rekoruyla regülatörün su giriş-çıkış uçlarına bağlanmaktadır. Çalışmada, ek olarak regülatörün su giriş ve çıkışlarına elle kumanda edilen vanalar yerleştirilmiştir. Böylece, motor çalışmazken vanalar kapatılarak, sistem ısısının radyatör tarafından hızla tüketilmesi önlenmiş ve regülatörün daha uzun süre sıcak tutulabilmesi sağlanmıştır.

#### G. ÖLÇÜM CİHAZLARI

Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının ölçüm aralıkları ve hata yüzdeleri Tablo 4'te verilmiştir. Sıcaklık ölçer, ASTM standartlarına uygun bir termokupul ile 0-100°C aralığında kalibre edilerek

yapılacak ölçümlerin doğruluğu sağlanmıştır. Egzoz emisyonu test cihazının, firma servisi tarafından kalibrasyonunun yapılması sağlanmıştır.

*Tablo 4. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri*

<b>Ölçülen değer</b>	<b>Ölçüm aralığı</b>	<b>Hata payı</b>
Sıcaklık	0 – 200°C	±0,1°C
HC	0 – 10.000 ppm	±1 ppm
CO	0 – 10 %	±0,01%

#### *H. DENEYLERİN YAPILIŞI*

Yapılan çalışmada, motorun çalıştığı esnada üretilen ve soğutma suyu vasıtasıyla LPG regülatörüne taşınan ısı enerjisinin, regülatörde faz değiştiren malzeme aracılığıyla gizli ısı olarak depolanması yöntemi üzerinde durulmuştur. Sistemin ısınması (motor çalışırken) ve soğuması (motor çalışmazken) esnasındaki sıcaklık değişimleri; su giriş-çıkışından, LPG giriş-çıkışından, motor suyundan, PCM ve regülatörden ölçülmüştür. Tüm ölçümler, aynı koşulları sağlayabilmek için rölanti devrinde yapılmıştır. Testler üçer kez tekrarlanmış ve verilerin ortalaması değerlendirilmiştir. Deneylerde 95 oktanlı kurşunsuz benzin ile %50 propan ve %50 bütandan oluşan LPG yakıtları kullanılmıştır.

Motorun çalışması esnasında, regülatörün su kanallarında dolaşan motor soğutma suyunun sıcaklığıyla faz değiştiren malzeme ısınmakta, bir müddet sonra faz değiştirme gizli ısını depolayarak sıvı hale geçmektedir. Motorun durdurulması sırasında ise, su vanaları kapatılmakta ve kapalı sistem, faz değiştiren malzemenin vereceği ısı ile sıcak tutulmaktadır. Sistemin belirlenen noktalarındaki sıcaklık değerleri belli zaman aralıklarında okunmakta ve kaydedilmektedir.

Deneyler ortalama 4°C sıcaklıkta, kapalı bir laboratuvar ortamında yapılmıştır. Soğuma ve ısınma durumlarında taşıtın kaputu kapatılmış, böylece gerçek çalışma koşulları oluşturulmuştur. Sistemdeki sıcaklık değişimlerinin ölçümleri, ısı depolama süreci ve ısı kullanım süreci olmak üzere iki safhada incelenmiştir. Deneylerde kullanılan ısı depolamalı regülatör sistemi Şekil 5'te görülmektedir.

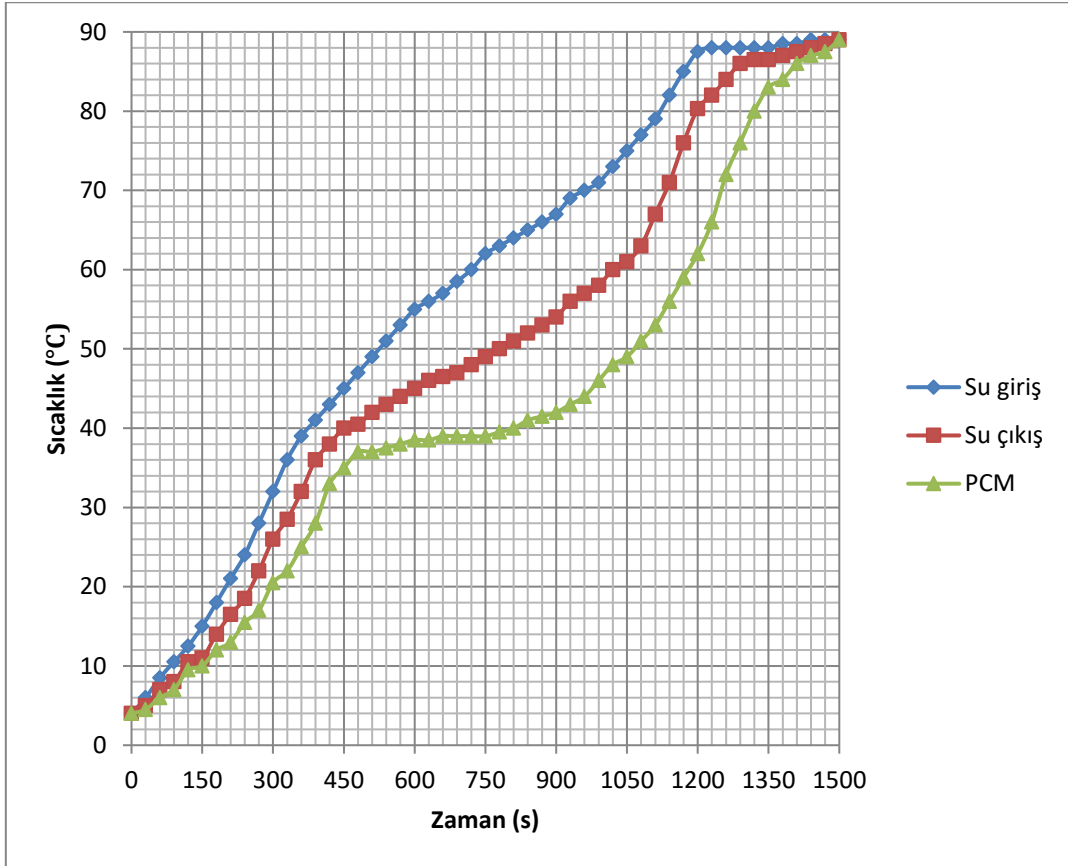


*Şekil 5. Isı depolamalı regülatör sisteminden bir görünüm*

### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

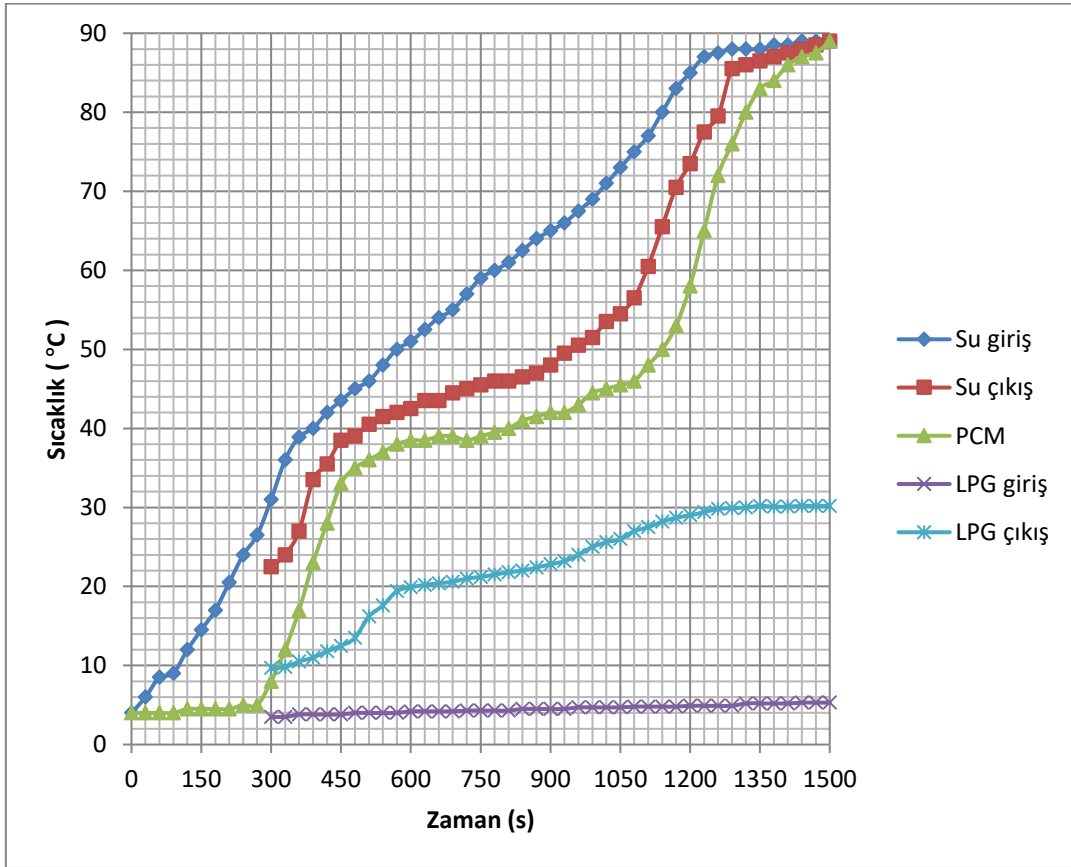
#### A. ISIL ENERJİNİN DEPOLANMASI

Isı depolama periyodunda, motor benzin yakıtı ile çalıştırılırken, ısı depolamalı regülatör sistemindeki su giriş-çıkış ve PCM sıcaklıklarının zamana bağlı değişimleri Şekil 6'da görülmektedir. Bu sırada sisteme LPG girişi olmamakta ve motor soğutma suyunun ısısı PCM tarafından depo edilmektedir. Su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki fark, PCM'in faz değiştirme sıcaklığına (36°C) ulaşmasına kadar çok küçük kalmaktadır. Bu farkı oluşturan ısı geçişi, PCM'in depoladığı hissedilebilir enerjisini artırarak, sıcaklığının artmasını sağlamaktadır. PCM'in faz değiştirme sıcaklığına ulaşıp katı halden sıvı hale geçmeye başlaması ile birlikte, su giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki fark artmakta ve yüksek miktardaki ısı PCM tarafından gizli ısı olarak depolanmaktadır. Su giriş sıcaklığı motorun çalışma sıcaklığına kadar yükselmekte (termostat açılana kadar) ve bu noktada kararlı hale geçmektedir. Su çıkış sıcaklığı ise, PCM'in erime sıcaklığına ulaşmasına kadar hızla yükselmekte (450 saniye civarı), daha sonra malzemenin faz değiştirmesi süresince yavaşlamaktadır. PCM'in tamamen eriyip sıvı hale geçmesinden (yaklaşık 550 saniye) sonra sıcaklığı tekrar yükselmekte ve bir müddet sonra kararlı hale ulaşmaktadır. PCM'in sıcaklığı ise, erime sıcaklığına ulaşmasına kadar hızla yükselmekte (450 saniye civarı), daha sonra ise sıcaklığı erime sıcaklığı civarında yaklaşık 500 saniye sabit kalmaktadır. Bu süreden sonra PCM sıcaklığı yükselerek su sıcaklığına ulaşmakta ve kararlı hale gelmektedir. Böylece, tamamen soğumuş bir ısı depolamalı regülatör sisteminin, sadece benzinli çalışma ile, 15 dakika civarında gizli ısı depolama işlevini tamamladığı görülmektedir.



Şekil 6. Isı enerjisinin depolanması (Benzinde çalışma)

Isı depolama periyodunda, motor LPG yakıtı ile çalıştırılırken, ısı depolamalı regülatör sistemindeki su giriş-çıkış, LPG giriş-çıkış ve PCM sıcaklıklarının zamana bağlı değişimleri Şekil 7’de görülmektedir. Bu çalışma periyodunda motor önce benzin yakıtıyla çalıştırılmaktadır ve bu sürede ısı depolamalı regülatör sisteminin tüm vanaları kapalı durumdadır. Motor suyunun ısınmasıyla birlikte (30°C) su giriş-çıkış vanaları açılmakta ve motor LPG yakıtı ile çalıştırılmaktadır. Sisteme sıvı halde giren LPG, regülatör tarafından buharlaştırılmakta ve enjeksiyon hattına ulaşmaktadır. Bu çalışma periyodundaki su giriş-çıkış ve PCM sıcaklıklarının değişimi benzinli çalışmadaki değişimlerle aynı trendi göstermektedir. Ancak regülatörden geçen LPG’nin çektiği buharlaşma ısısı PCM’in biraz daha geç ısınmasına ve su çıkış sıcaklığının bir miktar düşmesine neden olmaktadır. Sistemdeki PCM’in tamamen erimesi ve gerekli gizli ısıyı depolaması yaklaşık olarak 800 saniye (yaklaşık 13 dakika) sürmektedir. LPG giriş sıcaklığı değişmemekte, çıkış sıcaklığı ise sistemin ısınmasıyla birlikte yükselmektedir. LPG çıkış sıcaklığı 30°C civarında kararlı bir sıcaklığa ulaşmaktadır.



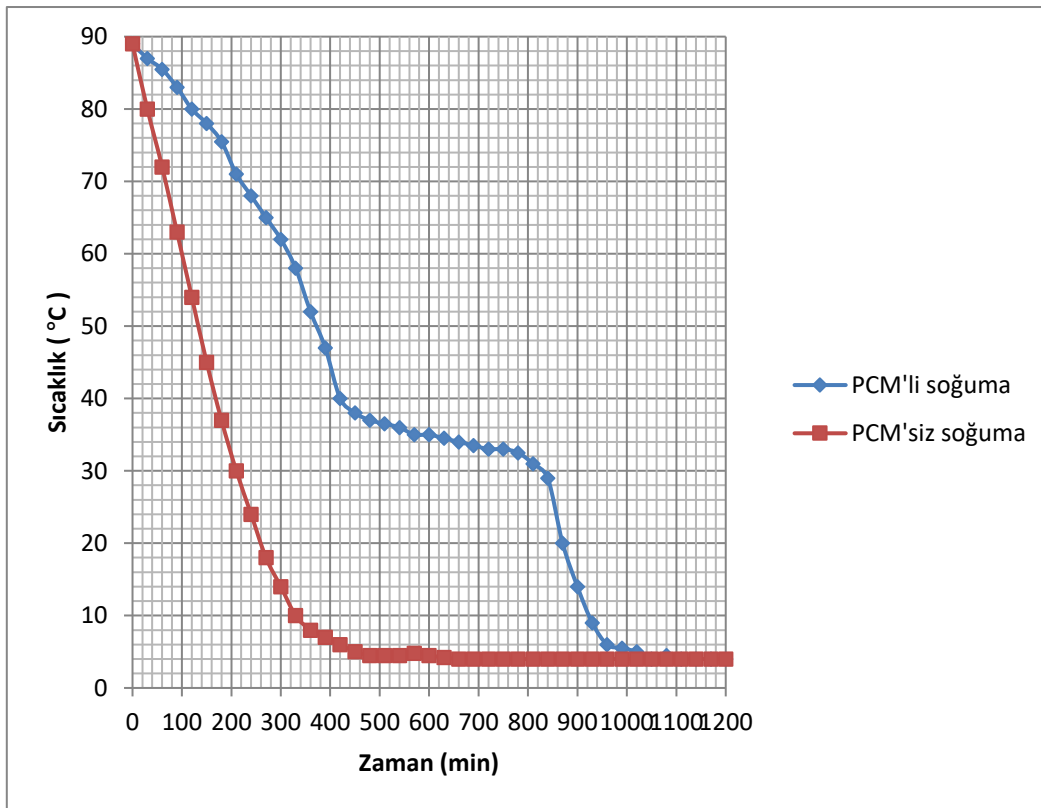
Şekil 7. Isı enerjisinin depolanması (önce benzinli sonra LPG’li çalışma)

## B. ISIL ENERJİNİN KORUNUMU

Isıl enerji korunumuyla ilgili yapılan deneylerde amaç, ısı depolamalı regülatörün depolamış olduğu ısı enerjisini muhafaza edebilme süresini tespit etmektir. Bu deneylerde 90°C’ye kadar ısıtılmış ve motor üzerinde beklemeye bırakılmış ısı depolamalı regülatörün sıcaklık değişimi ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri 30 dakika aralıklarla yapılmıştır. Bu ölçümlerde motor kaputu ve ısı depolamalı regülatör sisteminin su giriş-çıkış vanaları sürekli kapalı tutulmuştur. Bu ölçümler hem PCM’li hem de PCM’siz regülatörler için yapılmıştır.

Isı enerjisini koruma periyodundaki, ısı depolamalı (PCM'li) ve ısı depolamasız (PCM'siz) regülatör sıcaklıklarının yaklaşık 4°C dış ortam sıcaklığındaki zamana bağlı değişimleri Şekil 8'de görülmektedir.

PCM'siz normal bir regülatör, motor stop edildiği andan itibaren hızla soğumakta ve 3 saat civarında çalışma sıcaklığının altına düşmektedir. Tasarlanan PCM'li regülatörün ise PCM'siz regülatöre nazaran daha yavaş soğuduğu ve malzemenin faz değiştirme sıcaklığına düşmesinin yaklaşık 400 dakika sürdüğü görülmektedir. PCM'in faz değiştirme sıcaklığına ulaşmasıyla birlikte sıcaklık düşmesinin çok yavaşladığı görülmektedir. Bunun nedeni PCM'in sahip olduğu yüksek gizli ısıdır. Isı depolamalı regülatörün sıcaklığının faz değiştirme sıcaklığından motorun LPG ile çalışabildiği regülatör sıcaklığına (30°C) düşmesi yaklaşık olarak 500 dakika sürmektedir. Böylece ısı depolamalı regülatörün motor çalışma sıcaklığından motorun LPG ile çalışabildiği regülatör sıcaklığına ortalama 900 dakika (15 saat) da indiği kabul edilebilir. Bu şartlarda, akşam çalışma sıcaklığında park edilen aracın ertesi sabah direkt LPG ile çalışabileceği düşünülürse, tasarlanan ısı depolamalı regülatör sisteminin amacına ulaştığı görülmektedir.

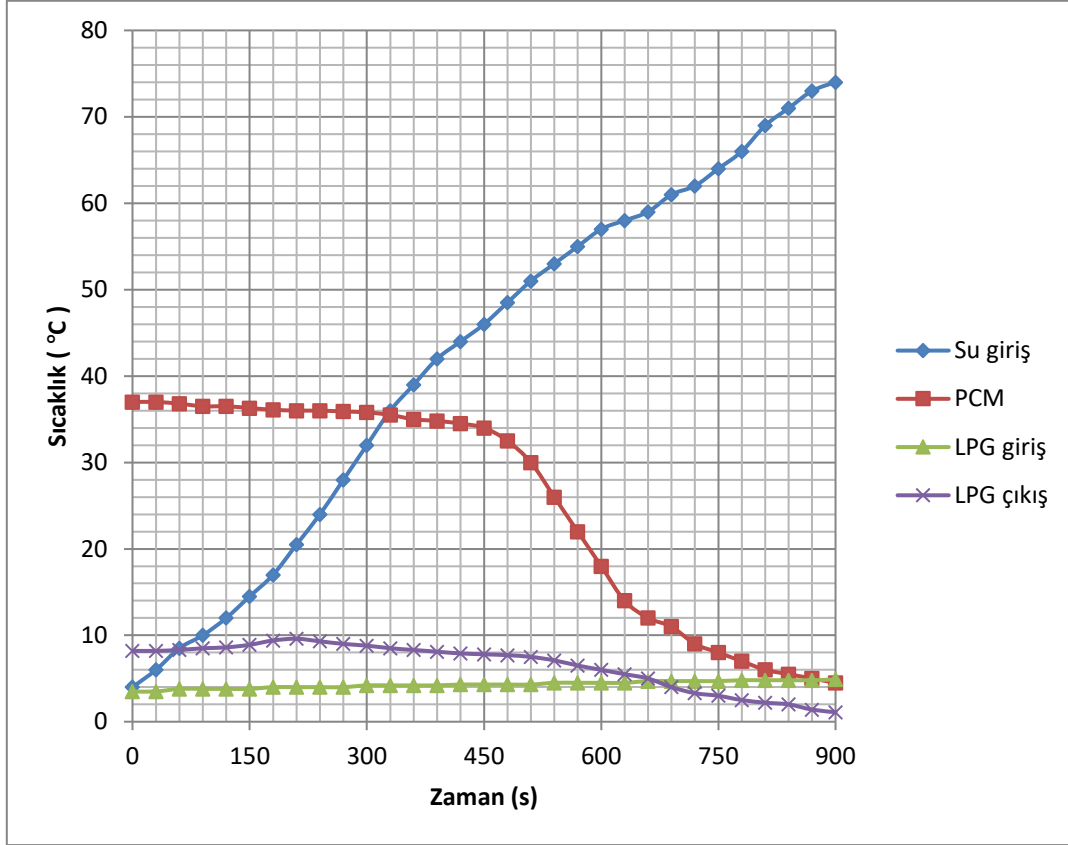


Şekil 8. Depolanan ısı enerjisinin korunumu

### C. ISIL ENERJİNİN KULLANIMI

Şekil 9'da, 4°C dış ortam sıcaklığında 12 saat soğumaya bırakılan ve PCM'in gizli ısıyla ısı depolamış regülatörün, harici ısı kaynağı olmaksızın (su giriş-çıkışları kapalı konumda) motoru direkt LPG'de çalıştırması durumundaki su girişi, LPG giriş-çıkışı ve PCM sıcaklık değişimleri görülmektedir. Regülatörden geçmekte olan LPG, buharlaşabilmek için sistemden ısı çekmektedir. İhtiyaç duyulan yüksek miktardaki ısı enerjisi, PCM'in depo ettiği ısıdan karşılanmaktadır. Isı

kaybeden PCM sıvı halden katı hale geçmekte ve belli bir süre sonunda (yaklaşık 500 saniye) katılaşmaktadır. Gerekli ısının karşılanamaması neticesinde LPG tam olarak buharlaşmamakta ve kısa süre sonra motor stop etmektedir. Motor soğutma suyunun, soğuk çalıştırmadan yaklaşık 300 saniye sonra regülatörün çalışma sıcaklığına ulaştığı düşünüldüğünde, ısı depolamalı regülatörün 500 saniye boyunca 30°C'nin üzerinde kalması bu sistemin LPG dönüşüm sistemlerindeki soğuk çalışma probleminin çözümünde yeni bir yöntem olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

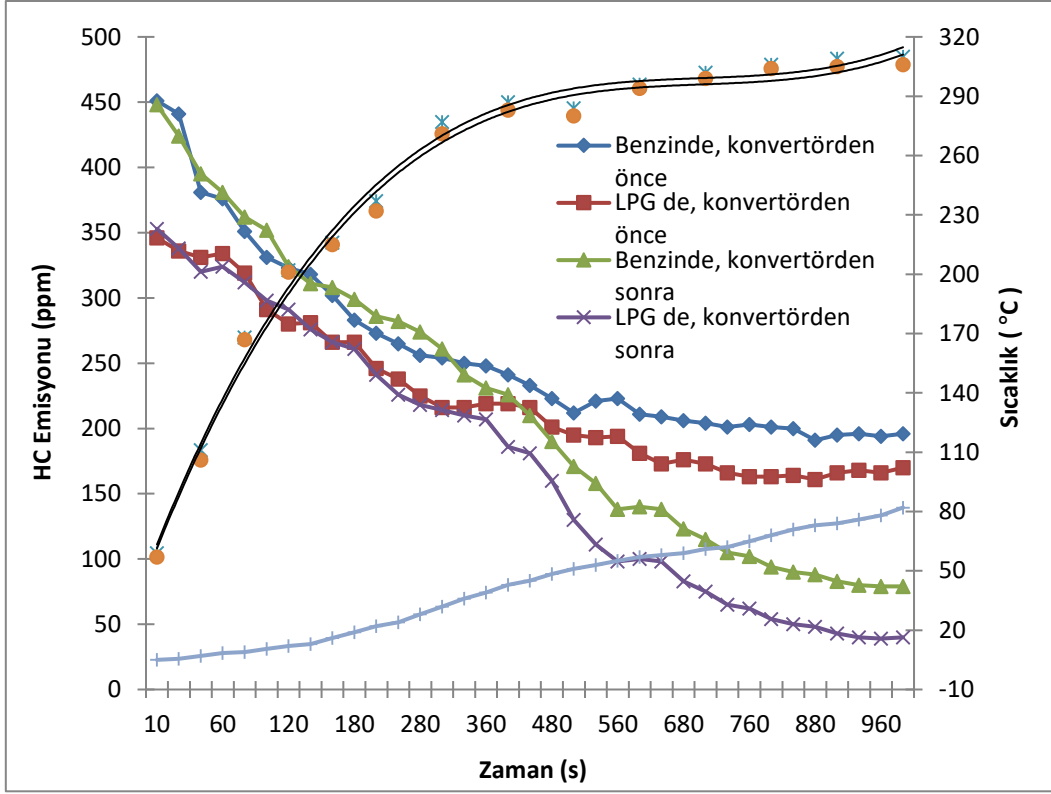


Şekil 9. Isı enerjisinin kullanımı (LPG'li çalışma)

#### D. HİDROKARBON EMİSYONLARININ DEĞİŞİMİ

Şekil 10'da, HC emisyonlarının benzinli ve LPG'li çalışmalarda, konvertörden önceki ve sonraki değerleri motor ve konvertör sıcaklıklarının değişimine bağlı olarak görülmektedir. Motor suyu sıcaklığının artmasıyla, hem benzin hem de LPG yakıtı kullanımında konvertör öncesi ve sonrasındaki HC emisyonlarının değerleri düşüş göstermektedir. Benzin yakıtı kullanımındaki motor soğutma suyu sıcaklığı, LPG yakıtı kullanımındakinden kısa bir süre önce rejim sıcaklığına ulaşmaktadır. Bu fark küçük olduğundan emisyonların gösteriminde bu sıcaklıkların ortalama değerleri kullanılmıştır. Benzin yakıtının kullanımındaki HC egzoz emisyonları tüm ısınma sürecinde ve konvertör öncesi-sonrasında, motorun LPG yakıtı ile çalıştırılması durumundakilerden yüksek olarak bulunmuştur. Benzinin adyabatik alev sıcaklığının LPG'den yüksek olmasından dolayı, konvertör sıcaklığı benzin yakıtı kullanımında daha yüksek olarak belirlenmiştir. Konvertörün etkin çalışma sıcaklığına (350 saniyede 280°C) ulaşması ile birlikte, konvertör sonrasında HC emisyon değerleri hızla düşmektedir. Motorun benzin yakıtı kullanımında konvertör kullanımı HC emisyonlarında 1000 saniyelik ısınma sürecinde %16,27 azalma sağlamaktadır. Konvertörsüz LPG kullanımında ise konvertörsüz benzin

yakıtı kullanımına göre % 13,74 azalma sağlanmaktadır. LPG yakıtının kullanımında konvertör kullanımıyla bu azalma %33,60'a çıkmaktadır. Konvertörün etkin sıcaklığına gelme süresince motorun ısı depolamalı sistem vasıtasıyla direkt LPG yakıtı ile çalıştırılmasının HC emisyonlarının azaltılması açısından fayda sağlayacağı görülmektedir. Yapılan bu deneyle, özellikle soğuk çalıştırma sırasında motorun LPG yakıtıyla çalıştırılmasında HC emisyonlarında önemli düşüşler sağlanacağı anlaşılmaktadır.

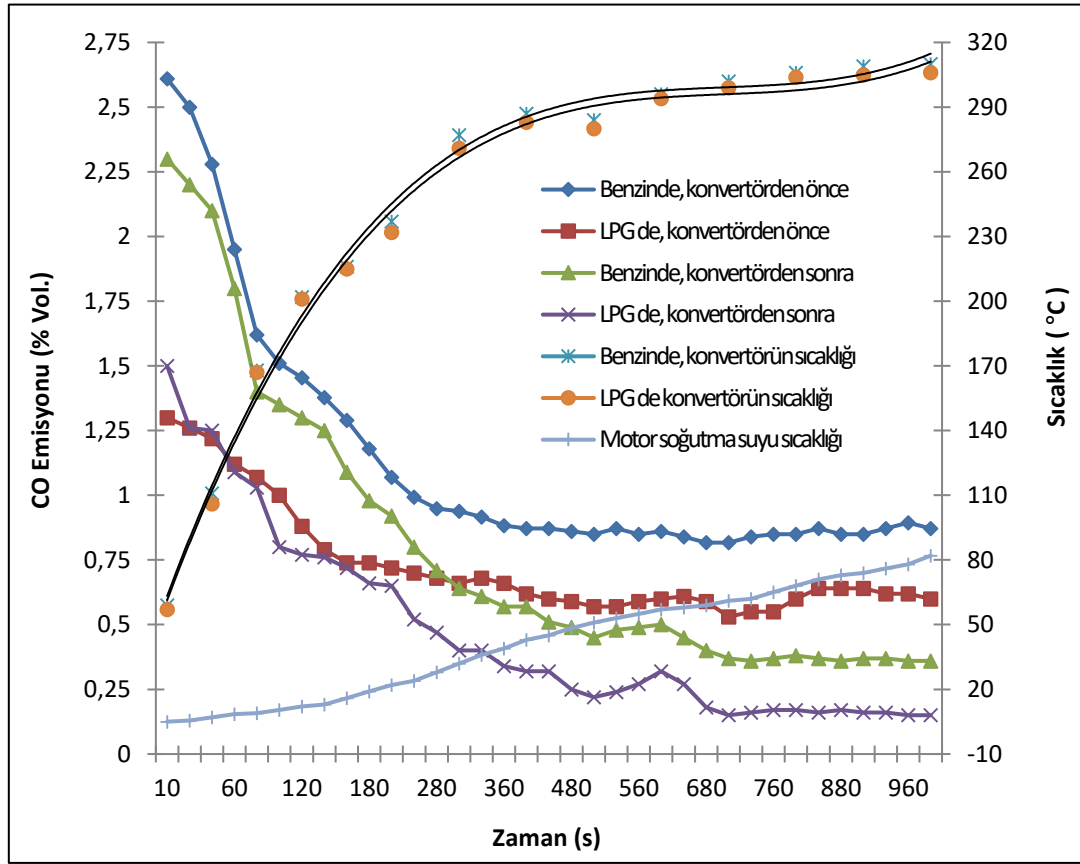


Şekil 10. HC emisyonları karşılaştırması

### E. KARBONMONOKSİT EMİSYONLARININ DEĞİŞİMİ

CO emisyonlarının değişimi benzinli ve LPG'li çalışmalarda, konvertörden önceki ve sonraki değerleri motor ve konvertör sıcaklıklarının değişimine bağlı olarak Şekil 11'de görülmektedir. CO emisyonu ölçüm sonuçlarında, HC emisyonlarındakine benzer bir eğilim elde edilmiştir. Motor suyu sıcaklığının artmasıyla, hem benzin hem de LPG yakıtı kullanımında konvertör öncesi ve sonrasındaki CO emisyonlarının değerleri düşüş göstermiştir. Ancak, motor soğutma suyunun yaklaşık 40°C civarına (yaklaşık 300 saniyede) ulaşmasıyla CO emisyonları bütün durumlar için kararlı bir hale geçmektedir. LPG yakıtının kullanımındaki CO egzoz emisyonları tüm ısınma sürecinde ve konvertör öncesi-sonrasında, motorun benzin yakıtı ile çalıştırılması durumundakilerden düşük olarak bulunmuştur. Motorun benzin yakıtı kullanımında konvertör kullanımı CO emisyonlarında 1000 saniyelik ısınma sürecinde %29,54 azalma sağlamaktadır. Konvertörsüz LPG kullanımında ise konvertörsüz benzin yakıtı kullanımına göre %35,77 azalma sağlanmaktadır. LPG yakıtının kullanımında konvertör kullanımıyla bu azalma %58,25'e çıkmaktadır. Konvertörün etkin çalışma sıcaklığına ulaşması ile birlikte, konvertör sonrasında CO emisyon değerleri hızla düşmektedir. Konvertörün etkin sıcaklığına gelme süresince motorun ısı depolamalı sistem vasıtasıyla direkt LPG yakıtı ile çalıştırılmasının CO emisyonlarının azaltılması açısından çok daha belirgin faydalar

sağlayacağı belirlenmiştir. Soğuk çalıştırma sırasında motorun LPG yakıtıyla çalıştırılmasında CO emisyonlarında meydana gelen düşüşler HC emisyonlarında meydana gelen düşüşlerden daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 11. CO emisyonları karşılaştırması

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, LPG yakıtı kullanabilecek şekilde dönüşümü yapılmış bir taşıt motorundaki soğuk çalıştırma probleminin çözümü için, LPG dönüşüm regülatörünün çalışma sıcaklığıyla uyumlu olacak şekilde seçilen bir faz değıştiren malzeme kullanımıyla, ısı enerjisi depolayabilen bir regülatör tasarlanmıştır. Isı depolamalı regülatörün taşıt motoru üzerinde, rölanti çalışma koşullarındaki ısıl davranışı incelenmiştir. Ayrıca ısı depolamalı regülatörün kullanılması ile oluşan egzoz emisyonları (HC, CO) benzinli çalışmadaki emisyonlar ile karşılaştırılmıştır.

Isı depolamalı regülatör sisteminin 4°C ortam sıcaklığındaki ısı depolama periyodu, motor benzin yakıtı ile çalıştırılırken yaklaşık 1000 saniye sürerken LPG yakıtı ile çalıştırıldığında yaklaşık olarak 1100 saniye sürmektedir. Aynı ortam sıcaklığındaki ısı korunum periyodu ise yaklaşık 900 dakika (15 h) olmuştur. Motorun yalnız LPG yakıtı ile aynı ortam sıcaklığında rölantide çalışma durumunda, ısı kullanım periyodu ise 500 saniye sürmüştür. Motorun çalışması esnasındaki ısının PCM'de depolanarak, motorun çalışmadığı sürede kullanılması prensibi başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Motorun 12 saatlik soğumasından sonra, konvertörün devrede olması durumunda motorun direkt LPG yakıtı ile çalıştırılması ile benzine nazaran HC emisyonlarında %17,32 ve CO emisyonlarında %28,71 düşüş elde edilmiştir.

Isı depolamalı regülatörün LPG dönüşüm sistemlerinde kullanılmasıyla, motorun soğuk çalıştırılmasında da LPG yakıtının kullanımı mümkün olabilecektir. Böylece LPG'nin benzine oranla ekonomikliği sayesinde, LPG dönüşüm sistemlerinin sağlamış olacağı yakıt ekonomisi artırılmış olacaktır.

Isı depolamalı regülatör sisteminin kullanımının bir diğer faydası ise, regülatörde meydana gelen yüksek sıcaklık değişimlerinin engellenmesidir. Özellikle soğuk havalarda, regülatördeki sıcaklık farkları 90°C'lere ulaşmaktadır. Kullanılan faz değiştiren malzeme ile bu sıcaklık farkları azaltılabilmektedir. Böylece, regülatörün üzerindeki ısıl gerilimler azaltılabilmekte ve özellikle regülatörün bakım periyodunu belirleyen regülatör içerisindeki kauçuk diyaframın kullanım ömrü artırılabilir.

Elde edilen test sonuçlarıyla, tasarlanan ısı depolamalı regülatörün LPG yakıtı kullanabilecek şekilde dönüşümü yapılmış taşıt motorlarındaki soğuk çalıştırma problemini çözebileceği görülmüştür. Bu regülatörün kullanımıyla LPG yakıtından beklenen yakıt ekonomisi artırılabilir ve çevreye yayılan kirletici emisyonlar iyileştirilebilmektedir. Kalabalık şehirlerde, araç sayısının fazlalığı ve oluşturdukları zararlı egzoz emisyonları dikkate alındığında önerilen sistemin önemli faydalar sağlayacağı anlaşılmaktadır. Sistemin etkinliğinin artırılması için aşağıdaki belirtilen hususlarda çalışmaların sürdürülmesi faydalı olacaktır:

- Daha yüksek bir ısı depolama kapasitesine sahip, farklı tiplerde faz değiştiren malzemelerin denenmesi,
- Daha iyi bir tasarım ile faz değiştiren malzemenin, regülatör gövdesinin içerisine farklı geometrilerde konularak denenmesi,
- Daha iyi bir izolasyonun uygulanması,
- Sistemin endüstriyel bir ürün haline getirilmesi için elle kontrol edilen vanalar yerine, LPG dönüşüm sisteminin kontrol ünitesi tarafından kumanda edilebilecek elektromanyetik valflerin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca farklı gövde malzemesinden üretilen ısı depolamalı regülatör sisteminin, gerçek yol şartlarında kullanımıyla ömür testlerinin yapılması gerekmektedir.

## V. KAYNAKLAR

[1] R. Dönmez, T. Gülü, "Taşıtlarda LPG kullanımı ve sonuçları," 3. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Ankara, Türkiye, 2007, pp. 153-159.

[2] P. Price, S. Guo, M. Hirschmann, "Performance of an evaporator for an LPG powered vehicle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, pp. 1179–1194, 2004.

- [3] Voltran Alternative Fuel Systems, Voltran Installation Manual, Istanbul, 2007, pp. 1-49.
- [4] M. Gümüş, E. Kılıçaslan, A. K. Binark, *Application of phase change materials to pre-heating of internal combustion engines*, 3. Uluslararası İleri Teknolojiler Semp., Ankara, Ağustos, (2003), 18-20.
- [5] L. L. Vasiliev, V.S. Burak, A. G. Kulakov, D. A. Mishkinis, P.V. Bohan, "Heat storage device for pre-heating internal combustion engines at start-up," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 38, pp. 98-104, 1999.
- [6] L. L. Vasiliev, V.S. Burak, A. G. Kulakov, D. A. Mishkinis, P.V. Bohan, "Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: Application to a bus petrol engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, pp. 913-923, 2000.
- [7] Z. Liu, L. Li, B. Deng, "Cold start characteristics at low temperatures based on the first firing cycle in an LPG engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 395–404, 2007.
- [8] G. Li, L. Li, Z. Liu, Z. Li, D. Qiu, "A real time no emissions measurement during cold start in LPG SI engine," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 2508–2516, 2007.
- [9] H. Kwak, C. L. Myung, S. Park, "Experimental investigation on the time resolved THC emission characteristics of liquid phase LPG injection (LPLI) engine during cold start," *Fuel*, vol. 86, pp. 1475–1482, 2007.
- [10] D. G. Snelgrove, P. Dupont, R. Bonetto, "An investigation into the influence of LPG (autogas) composition on the exhaust emissions and fuel consumption of 3 bi-fuelled renault vehicles," *SAE Papers*, vol. 961170, 1996.
- [11] D. Y. Wu, R. D. Matthews, J. Zheng, K. Shen, J. Chiu, C. Mock, S. Jaeger, "Texas project: Part 3–cycle emissions of light-duty vehicles operating on CNG, LPG, federal phase 1 reformulated gasoline and/or low sulphur certification gasoline," *SAE Special Publications*, vol. 1208, pp. 385–414, 1996.
- [12] R. F. Klausmeier, I. F. Billick, "Comparative analysis of the environmental impact of alternative transportation fuels," *Energy & Fuels*, vol. 7, pp. 1–2, 1993.
- [13] M. S. Newkirk, L. R. Smith, M.E. Payne, J.S. Segal, "Reactivity and exhaust emissions from an EHC-equipped LPG conversion vehicle operating on butane/propane fuel blends," *SAE Special Publications*, vol. 1208, pp. 195–206, 1996.
- [14] P. Bielaczyc, A. Szczotka, H. Brodzinski, "Analysis of the exhaust emissions from vehicles fuelled with petrol or LPG and CNG alternatively," *Journal of Kones Combustion Engines*, vol. 1-2, pp. 363-370, 2001.
- [15] P. Bielaczyc, J. Merkisz, "Euro III/Euro IV emissions – A study of cold start and warm-up phases with a SI (spark ignition) engine," *SAE Papers*, vol. 1, pp. 1073, 1999.
- [16] S. Huixian, S. Tariq, S. Subrate, "An investigation of catalytic converter performances during cold starts," *SAE Papers*, vol. 01, pp. 3473, 1999.

- [17] C. Yong, W. Jian-Xin, Z. Ren-Jun, W. Ning, "Analysis of combustion behavior during cold-start and warm-up process of SI engine," *SAE Papers*, vol. 1, no. 3557, 2001.
- [18] M. Gumus, A. Ugurlu, "Application of phase change materials to pre-heating of evaporator and pressure regulator of a gaseous sequential injection system," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 4803–4810, 2011.
- [19] M. Gumus, "Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of thermal energy storage system", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, pp. 652-660, 2009.
- [20] E. Korin, R. Reshef, D. Tshernichovesky, and E. Sher, "Reducing coldstart emission from internal combustion engines by means of a catalytic converter embedded in a phase change material", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, London, 1999.
- [21] N. Javani, I. Dincer, G. F. Naterer, G. L. Rohrauer, "Modeling of passive thermal management for electric vehicle battery packs with PCM between cells", *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, pp. 307-316, 2014.
- [22] M. Ahmed, O. Meade, M. A. Medina, "Reducing heat transfer across the insulated walls of refrigerated truck trailers by the application of phase change materials", *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 383–392, 2010.