
Makale / Research Paper

İçten Yanmalı Motorlarda Pnömatik Tahrik Sistemlerinin Uygulanabilirliği Üzerine Bir Çalışma

M. Akif KUNT, Haluk GÜNEŞ

Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Meslek Yüksek Okulu Motorlu Taşıtlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü
Otomotiv Programı
43300 Tavşanlı-Kütahya, Türkiye

Özet: Bu çalışmada içten yanmalı motorlarda pnömatik tahrik sistemlerinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Pnömatik motorlar silindir içerisine basınçlı gaz akışkan olarak genişleme işi elde eden makinelerdir. Bu motorlar ateşleme sistemi gerektirmeyen, daha az yağlama yağı tüketen, çevre kirliliği bulunmayan ve egzoz akışkanını yeniden kullanabilen makinelerdir. Pnömatik motorların yaygınlaşması yerli enerji kaynaklarının da daha etkin kullanılmasını sağlayacaktır. Pnömatik motor depolarının doldurma maliyetlerinin azaltılması halinde bu motorlar motosiklet, toplu taşıma araçları, hibrit motorlarda, gıda, kimya ve askeri sanayide daha yaygın kullanılabilirlerdir.

Anahtar Kelimeler: Pnömatik motor, alternatif motor, çevre kirliliği, hibrit motor

A Study on Applicability of Pneumatic Drive System in Internal Combustion Engines

Abstract: In this study, the applicability of the pneumatic drive system in internal combustion engines was investigated. Pneumatic motors are the machines expanded by getting fluid pressure gas into the cylinder. These type of motors, do not require ignition system, consume less lubrication oil, do not pollute the environment and can reuse exhaust fluid. Increasingly widespread use of pneumatic motors will allow more efficient use of domestic energy resources. In case of decrease the cost of filling pneumatic motor tanks, pneumatic motors can be more widely used in motorcycles, in public transportation vehicles, in hybrid engines, and also can be used in food, chemical and military industries.

Keywords: Pneumatic engine, alternative engine, environmental pollution, hybrid engine

1. Giriş

Günlük yaşamımızda kullandığımız araçlar, spor amaçlı taşıtlarda, kamyonlarda, minibüslerde ve uçaklarda tüketilen enerjinin yaklaşık olarak %97'si petrol kökenli kaynaklardan karşılanmaktadır [1]. Fosil kökenli yakıtların giderek azalması, yaşanan enerji krizleri, çevre kirliliği, küresel ısınma gibi insan yaşamını yakından ilgilendiren sıkıntılar insanoğluna 20. yüzyılın son 25 yılında alternatif, ucuz ve temiz enerji kaynaklarını yaşamına dahil etmeyi zorunlu hale getirmiştir. İş akışkanı olarak sıkıştırılabilen gazları kullanan motorlara pnömatik motorlar denilmektedir. Bu

Bu makaleye atıf yapmak için

Kunt, M.A., Güneş, H., "İçten Yanmalı Motorlarda Pnömatik Tahrik Sistemlerinin Uygulanabilirliği Üzerine Bir Çalışma" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2015, 2(2); 41-59.

How to cite this article

Kunt, M.A., Güneş, H., ".....", 2015, 2(2); 41-59.

motorlar içten yanmalı motorların yanma sonunda elde ettikleri 40–45 bar basıncı doğrudan yüksek basınçlı depodan alarak silindir içerisine vermektedirler. Pnömatik motorlar özel olarak herhangi bir fosil yakıt türü kullanmayıp yalnızca kompresörün sıkıştırarak depoya gönderdiği basınçlı gazı kullanmaktadır. Fosil yakıtları kullanmamaları sebebiyle CO, SO_x, CO₂ gibi kirleticiler meydana gelmemektedir. Basınçlı gazın silindir içerisinde kullanımından sonra egzoz yoluyla dışarı atılan gazların yeniden kullanılabilmesi de mümkün olmaktadır. Bu durum pnömatik motorların termik verimlerini yükseltmektedir.

Hayatımıza yeni yeni giren ve yakıt türü olarak elektrik kullanan taşıtların satın alma maliyetlerinin yüksek olması, gerektiğinde gerekli bakım ve onarımları yapmak üzere kurulmuş servis istasyonu sıkıntısı, düşük şarj kapasiteleri, uzun şarj süreleri ağır bataryaları ve sınırlı menzilleri mahsurlarından bazılarıdır [2].

Günümüzde kullanımı bulunan hibrit taşıtlar çoğunlukla elektrik hibrittir. Bu araçlar seri ve paralel hibrit elektrikli taşıtlar olmak üzere iki temel yapıdadır ve bunların dezavantajları şunlardır.

Seri hibrit elektrikli taşıtların başlıca dezavantajları;

- Bu sistemde içten yanmalı motor, jeneratör ve elektrik motoru olmak üzere üç tahrik ekipmanına ihtiyaç duyulur.
- Elektrik motoru gerekli olan azami gücü karşılayacak şekilde, özellikle yüksek eğimler için tasarlanır. Fakat araç çoğunlukla azami gücün altında çalışmaktadır.
- Tahrik ekipmanları, batarya kapasitesinin birinci seviyede dikkate alınarak menzil ve performans için azami gücü karşılayacak şekilde boyutlandırılır.
- Güç sistemi ağır ve maliyeti daha yüksektir.

Paralel hibrit elektrikli taşıtların başlıca dezavantajları ise şunlardır:

- Gerekli olan güç iki farklı kaynaktan sağlandığı için burada enerji yönetimi önem arz eder.
- İçten yanmalı motor ve motordan gelen gücün tahrik tekerlerine düzgün olarak iletilebilmesi için karmaşık mekanik elemanlara ihtiyaç duyulur.
- Sessiz çalışma modu sağlamamaktadır.

Bir diğer yakıt türü ise, fosil yakıtlarının yakılması yerine, yakıt ile oksijenin elektro-kimyasal reaksiyonu sonucunda enerji üreten yakıt pildir. Yakıt pillerinde pratik uygulama öncesinde güvenli kullanım, maliyet, endüstriyel üretimin gerekliliği, yakıt pil ömrü, yakıtlarda istenilen yüksek oranda saflık derecesi gibi çözümlenmesi gereken önemli problemlerin bulunması elektrokimyasal jeneratörler ile ilgili pek çok belirsizlik meydana getirmektedir. Ayrıca seri üretime geçme öncesinde bir takım teknik ve ekonomik sorunların aşılması da gerekmektedir.

Motor yakıtlarının kolay buharlaşabilme, hava ile kolay karışabilme birim hacminden yüksek enerji sağlayabilme ve kolay tutuşabilme özelliklerinde olması istenmektedir [3]. Bu özellikleri açısından hidrojenin yakıt olarak kullanımı oldukça caziptir. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması durumunda yüksek miktarda NO_x oluşmakta, stokiometrik çalışma şartlarında % 20 güç kaybı meydana gelmektedir [4]. Ayrıca karbüratörlü motorlarda emme manifoldunda alev tepmesi önemli bir problemdir [5].

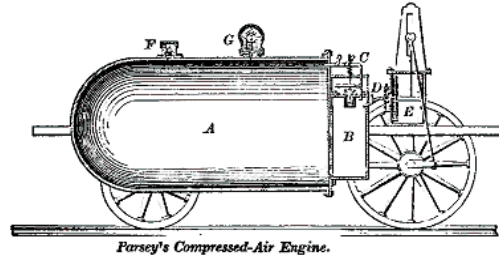
Bu çalışmada bataryaların elektrokimyasal enerjiyi depolaması esası yerine “iş akışkanı” depolayan, egzoz akışkanını yeniden kullanılmasına imkan sağlayan, atalet/momenti düşük, birim ağırlık başına düşen güç miktarı yüksek olan pnömatik motorlar tanıtılmıştır.

2. Pnömatik Motorlar

Pnömatik motorların tarihçesine bakıldığında ilk uygulamaların 19. yüzyılın sonlarına doğru yapıldığı görülmektedir. Ancak basınçlı havanın tahrik mekanizmalarında kullanımı fikri ilk olarak

1687 yılında Dennis Papin tarafından ortaya atılmış olup ilk olarak basınçlı havayı pnömatik lokomotiflerde uygulamıştır.

1847 yılında Arthur Parsey tek silindirli bir pnömatik motor patenti almıştır (US patent No 5,205). Pnömatik motorun tek silindirli olması sebebiyle motorun ölü noktaları atlama problemleri meydana gelmiştir. Parsey 'in pnömatik motoru basınçlı hava deposu (A), besleme odası (B), basınç düşürme valfi (C), basınçlı hava boruları (D), çift etkili silindir (E), hava supapları (F) ve emniyet valfinden (G) oluşmaktadır. Yapılan bu lokomotif kömür ocakları için düşünülmüş bir icat olma özelliğini taşımaktadır. Pnömatik motorun şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Parsey' in geliştirdiği pnömatik motor

1855 yılında Julienne isimli bir inşaatçı Fransa'nın Saint Dennis yerleşim yerinde 25 atmosfer basınçta çalışan bir basınçlı hava tahrik sistemi yapmıştır. Bu sistemde çift etkili silindir tahrik elemanı olarak kullanılmıştır. Bu sistemler 1874 yılında inşa edilen Simplon tüneli yapılırken taşıma amacıyla kullanılmıştır. Sistemde atılan serin hava tünel havalandırmasında kullanılmıştır.

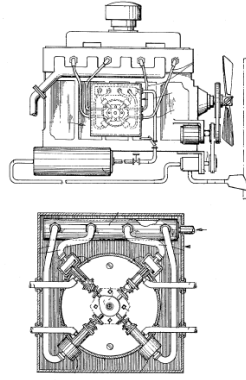
1872 yılında Mekarski'nin pnömatik motoru tramvay taşımacılığında kullanılmıştır. Mekarski'nin pnömatik motorunda sabit hacim içerisindeki hava ısıtılarak basıncı artırılmaktadır. Isıtılan havanın taşınması esnasında havanın ısı kayıplarını önlemek için basınçlı hava boruları sıcak su tankları içerisinden geçirilmiştir. O yıllarda bu esasa göre çalışan çok sayıda lokomotif üretilmiş olup ilk pnömatik lokomotifi 1879 yılında Nantes şehrinde kullanılmıştır. Bu sistemde taşıtın alt kısmına enine yerleştirilmiş olan 25 atmosfer basıncında 8 adet basınçlı hava tüpü bulunmaktadır. Bu tüplerin çapları 30-40 cm çapındadır. Basınçlı hava tüplerinin bir kısmı ana hava tüpleri diğer kısmı ise yedek basınçlı hava deposu olarak düşünülmüştür.

İlk pnömatik taşıt 1838-1840 yılları arasında Paris'te Andraud and Tessié du Motay tarafından yapılmıştır. Bu tarihten günümüze kadar pnömatik motorlar ile ilgili pek çok çalışma yapılmasına rağmen sıkıştırılmış havanın enerji taşıyabilme kapasitesinin düşük olması sebebiyle yakın geçmişe kadar otomobil üreticileri tarafından gereken ilgiyi görememiştir [6].

1898 yılında Hoadley ve Knight ilk şehir içi taşımacılıkta kullanılan pnömatik lokomotifi tanıtmışlardır. Bu lokomotif motorları silindir içerisine daha fazla ısıyı taşımakla birlikte iki pistonlu olarak yapılmışlardır.

Pnömatik motorların imalatı ve içten yanmalı bir motorun pnömatik motora dönüştürülmesi konusunda geçmişte çeşitli patentler alınmıştır. Richard V. Pierce, "Pneumatic Engine" isimli patentinde mekanik kumandalı bir pnömatik motor üretmiştir. Bu motorda emme ve egzoz supaplarının açık kalma süreleri yaklaşık 180° KMA'dır [7].

Garnet J. Simington, aldığı "Air Drive Adaptor" isimli patentinde içten yanmalı bir motoru mekanik bir basınçlı hava distribütör kullanarak pnömatik motora dönüştürmüştür [8].



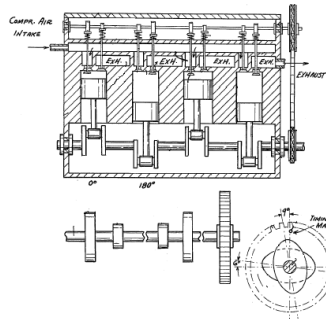
Şekil 2. Garnet J. Simington'un pnömatik motoru

Harry Charles Stricklin, aldığı “Converting an Internal Combustion Engine to a Single Acting Engine Driven by Steam or Compressed Air” isimli patentinde içten yanmalı bir motoru doğrusal hareketli bir supap sistemi kullanarak basınçlı hava yada buhar basıncı ile çalışabilir bir motor imal etmiştir [9].

Ray P. Spangler, almış olduğu “Vehicle Powered by Air Pressure Engine” isimli patentinde pnömatik motorların taşıt şasisi üzerindeki yerleşimini konu edinmiştir. Çalışmada kullanılacak basınçlı hava deposu olarak esnek ve dayanıklı bir yapıya sahip akordiyon tip basınçlı hava deposu da önerilmektedir. Bu türden basınçlı hava depoları daha verimli ve zamana bağlı olarak daha az basınç düşmesi sağlamaktadır [10].

William C. Wagner almış olduğu “Compressed Air Engine” isimli patentinde pnömatik motorların taşıtlarda kullanımı ve basınçlı havanın silindirlere uygun zamanda sürülmesini konu edinmiştir. Sistemin bataryası pnömatik motordan hareketini alan bir jeneratör tarafından şarj edilmektedir. Basınçlı hava deposundaki hava basıncı 25 bardır. Depodaki basınçlı hava bir basınç düşürücüden geçirilerek 10 bar çalışma basıncına düşürülmektedir. Basınçlı havanın miktarı bir hava keleşi ile değiştirilmekte, silindirlere sevk edilmesi külbütör mekanizması tarafından sağlanmaktadır [11].

John F. Murphy almış olduğu “Compressed Air - Operated Motor Employing Dual Lobe Cams” isimli patentinde çift tesirli bir kam mili profili kullanarak içten yanmalı bir motoru pnömatik motora dönüştürmüştür. Sistemde kullanılan basınçlı hava egzoz akışkanı olarak atmosfere atılmadan kompresöre yönlendirilmekte, kompresörde basıncı artırılan akışkan basınçlı hava tankına gönderilmektedir [12].



Şekil 3. John R. Murphy'in pnömatik motoru

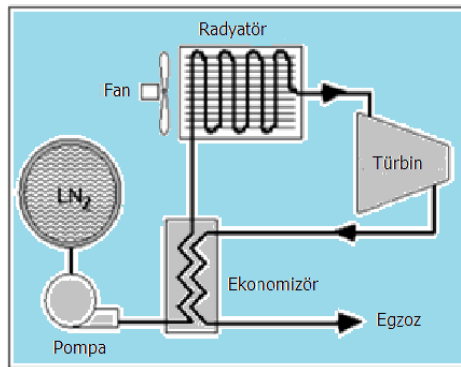
Yu-Chi Tsai aldığı “Piston Air Engine” isimli patentinde alçak hızlarda çalışan, oyuk açılmış piston ve manivelalı bir doldurma sistemine sahip bir pnömatik motor patenti almıştır [13].

Luis G. Cestero aldığı “Piston Reciprocating Compressed Air Engine” isimli patentinde 3 silindirli pistonlu bir pnömatik motoru patenti almıştır. Bu motorda ikinci silindir kompresör görevi yapmakta birinci ve üçüncü silindirler 180° KMA aralıklarla iş meydana getirmektedirler [14].

Joseph F. Blenke, Stanley J. Blenke almış oldukları “Air Power Motor” isimli patentte basınçlı havanın türbinde kullanımını incelemiştir. Basınçlı havanın kullanımı ile ilgili olarak araç üzerinde 3 adet basınçlı hava tankı bulunmakta, tanklardan bir tanesi yüksek basınçlı hava tankı diğerleri ise alçak basınçlı hava tankı olarak kullanılmaktadır. Sistemde araç üzerinde seyir halinde yüksek basınçlı hava deposunu doldurmak maksadıyla iki adet kompresör kullanılmıştır [15].

Jack V. Hormell Jr. almış olduğu “Compressed Air-Powered Engine” isimli patentte Mazda firmasının RX-7 modeline ait olan Wankel motorunu pnömatik motora dönüştürmüştür. Motorun çalıştırılmasıyla birlikte bir kayış vasıtasıyla hareketini motordan alan bir alternatör bataryayı şarj etmektedir. Taşıt üzerine monte edilmiş vidalı bir kompresör 3 adet basınçlı hava deposunu ihtiyaç durumunda doldurmaktadır [16].

Pnömatik motorlarının tarihsel gelişimine bakıldığında sıvılaştırılmış nitrojen kullanan tahrik sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar arasında yer alan bir çalışmada sıvı nitrojen (LN₂) motor silindiri içerisinde gazlaştırmak suretiyle iş meydana getirilmektedir. Plummer bu çalışmada LN₂ gazı kullanarak 850 1/min dönüş hızı sağlayarak 15 kW güç elde etmiştir. Bu sistemi kullanan bir taşıtta 200 litre sıvı nitrojen kullanıldığında 140 km mesafe kat edilebilmektedir. Brayton çevrimine göre çalışan bu sistemde birim sıvı nitrojen kullanımı başına üretilen enerji miktarının düşük olması bu sistemin mahsurudur.

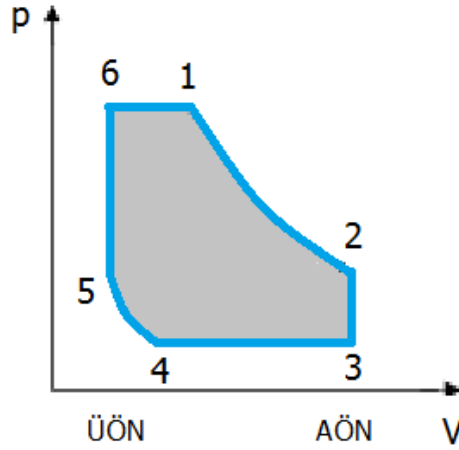


Şekil 4. Sıvı nitrojenli tahrik sistemlerinin şematik resmi [18].

Sıvı nitrojen kullanarak motorun tahrik edilmesiyle ilgili olarak Washington üniversitesine bağlı Aerospace ve Energetic Research programında Knowlen, Mattick, Bruckner, Hertzberg’ in de araştırmaları mevcuttur. Bu sistemin çalışması buhar tahrikli motorlara benzemektedir. Buhar yerine kullanılan nitrojen -196 °C’de depolanır, çevre sıcaklığında ise bir buharlaştırıcı tarafından buharlaştırılır. Kullanılan ısı eşanjörü araçlarda kullanılan radyatöre benzetilebilir. Yalnızca farkı havayı radyatörde suyu soğutmak için kullanırken bu sistemde sıvı nitrojeni buharlaştırmak için kullanılmasıdır. Meydana gelen yüksek basınçlı nitrojen gazı pistonlu buhar makinelerinde olduğu gibi düşey salınlı pistonları hareket ettirerek mekanik enerji elde eder. Çıkan egzoz akışkanı ise yine atmosferdeki ana bileşen olan nitrojendir. Bu çalışmada kullanılan motor 5 silindirli, 15 HP beygir gücüne sahip olup 5 ileri hız kademesine sahip Volkswagen transmisyonu kullanmaktadır. Sıvı nitrojen ısıya dayanıklı paslanmaz çelik depolarda depolanmaktadır. 24 galon nitrojen bu şekilde haftalarca depolanabilmektedir. Ön ısıtıcı adı verilen ekonomizör sıvı nitrojeni ısı eşanjörüne girmeden önce ısıtır. Arkada yer alan iki adet fan ise havayı ısı eşanjörüne yönlendirir [17]. Bu motorda supapların açılma zamanları kontrol edilebilmektedir. Çıkış milinden elde edilen

güç akan LN_2 miktarının değiştirilmesiyle kontrol edilir [18]. Şekil 4; Sıvı nitrojenli pnömatik tahrik sistemini göstermektedir.

Sahu; 4 silindirli bir benzinli motoru pnömatik tahrikli bir motor haline getirmiştir. Şekil 5; Sahu'nun pnömatik çevrim grafiğini göstermektedir. Bu çalışmaya göre çalışma çevrimi buhar türbinlerinin çalışma çevrimlerine benzemektedir. Sistemin çalışma çevrimi şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Sahu'nun pnömatik motor çevrim grafiği [19].

Çevrime göre 5 noktasında emme supabı açılmakta ve 1 noktasına kadar emme supabı açık kalmaktadır. 1 noktasından 2 noktasına kadar politropik olarak genişlemekte, 2 noktasında egzoz supabı açılmaktadır. Egzoz supabının açılması ile basınç atmosferik basınca kadar düşmektedir. 3 noktasından 4 noktasına kadar egzoz zamanı devam etmekte, 4 noktasında egzoz supabı kapanmaktadır. 4 noktasından 5 noktasına kadar ise silindir içerisinde kalan artık gazlar politropik olarak genişlemektedir [19]. Bu çalışmada değişik emme supabı zamanlaması ve tahrik basınçlarında tork karakteristikleri elde edilmiştir.

1991 yılında Guy Negre tarafından benzin ve sıkıştırılmış hava kullanan hibrit tahrikli bir taşıt tasarlanmıştır [20]. Guy Negre daha sonra yalnızca basınçlı hava ile çalışan bir motor tasarlamıştır.

1994 yılının Ağustos ayında "New Scientist" dergisi Terry Miller tarafından tasarlanıp Pneumacom şirketi tarafından üretilen pnömatik motorun tanıtımını yapmıştır. Ford Escort şasisi üzerine yerleştirilen sistem iki ayrı motordan oluşmaktadır. Motorlardan her biri 2 silindirden oluşmuş olup toplamda 4 genişleme elde edilmektedir. Basınçlı hava deposu hafif ve dayanıklı olması bakımından fiberglastan yapılmış olup depo hava basıncı 241 bardır. Depodaki yüksek basınçlı hava bir basınç regülatörü tarafından 35 basınca düşürülmektedir. Motorun kontrolü bir gaz kelebeği ile hava basıncının değiştirilmesiyle sağlanmaktadır.

1997 yılında ve Washinton State üniversiteleri birlikte yürüttükleri bir projeye sıvı nitrojen kullanan bir motor tasarlamışlardır [21-22].

2000 yılında Motor Development International (MDI) şirketi "Evolution" isminde hava tahrikli taşıtı Afrika otomobil fuarında sergilemiştir. Taşıtın altına yerleştirilen 300 litre hacminde basınçlı hava deposundan sağlanan basınçlı hava ile taşıt tahrik edilmekte ve 96 km/h sabit taşıt hızıyla 200 km yol kat etmektedir. Bu taşıtın basınçlı hava deposu bir şarj ünitesine bağlandığında 4 saat içinde şarj olabilmektedir [23].

2002 yılı ekim ayında Paris otomobil fuarında mini tip bir pnömatik motor satışa sunulmuştur.

Frenleme sırasında taşıtlardaki enerji kayıplarının geri kazanımı motor verimini geliştiren önemli bir parametredir. Huang ve diğerleri hibrit pnömatik motorlarda frenleme sırasında pnömatik motorun kompresör olarak kullanılarak pnömatik deponun doldurulması üzerinde çalışmalar yapmışlardır [24-26].

Pnömatik hibrit motorlar konusunda yapılan simülasyonlar şehir içi çevrimlerinde bu motorların yakıt tasarrufu konusunda büyük bir potansiyeli olduğunu göstermiştir [27-28].

İçten yanmalı motorların pnömatik hibridizasyonu hem benzinli hem de dizel motorlar için mümkündür. Benzinli motorların [29-30] ve dizel motorların [31-32] hibridizasyonu ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Schecter, hava tankı ile silindiri birleştiren doldurma supabına sahip yeni bir silindir kapağı tanıtmıştır. Doldurma supabı, motor sadece kompresör veya pnömatik motor olarak çalıştırıldığında kullanılmaktadır. Schecter şehir içi sürüş çevrimlerinde %50'den daha fazla yakıt tüketiminde azalma meydana geldiğini ifade etmiştir [33].

Tai ve arkadaşları üzerinde her silindir için 4 supabı bulunan kam milsiz bir supap mekanizması tanıtmışlardır. Emme supaplarından biri hava tankı ile irtibatlıdır. Araştırmacılar şehir içi seyir çevrimlerinde %64, şehirlerarası seyir çevrimlerinde %12 yakıt ekonomisi sağlamışlardır [34].

Fazeli ve arkadaşları hibrit pnömatik motorlarda enerji depolama kapasitesini artıracak yeni bir sıkıştırma sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde Andersson'un sıkıştırma sisteminin aksine tek bir depo bulunmakta, Schecter'in 2 silindirli sıkıştırma sisteminin aksine tek silindirli bir sıkıştırma sistemi kullanılmaktadır [35].

Ochel ve arkadaşları basınçlı havanın çok silindirli motorlarda kullanılması konusunda silindirlerden birinin içten yanmalı motor prensibine göre çalıştığı, diğerlerinin basınçlı havanın doldurulmasında kullanıldığı bir pnömatik motor patenti almıştır. Sistem hibrit olarak çalışabilmekte ve frenleme sırasında basınçlı hava deposunu doldurabilmektedir [36].

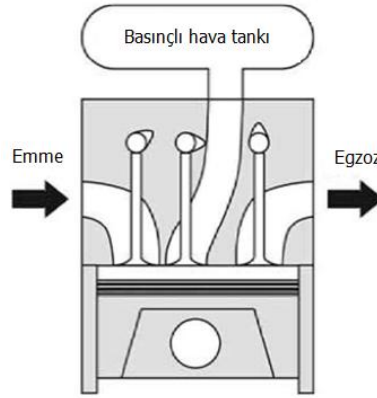
Saja Trajkovic ve arkadaşları pnömatik hibrit bir motorda değişken supap zamanlamalı bir elektromekanik supap geliştirmiştir. Bu supapların kullanılmasında 2,5 bar basınçlı hava kullanılmış, supapların oturma yüzeylerinde sessiz çalışması için hidrolik bir yavaşlatıcı kullanılmıştır. Test sonuçları incelendiğinde supap mekanizması yağ kaçaqları dışında test koşullarında iyi sonuçlar vermiştir [37].

Saja Trajkovic ve arkadaşları pnömatik hibrit bir motorda elektro-pnömatik bir supap uygulaması yapmışlardır. Bu sistemde yavaşlama sırasında rejeneratif frenlemeden yararlanılarak hava sıkıştırılmış, sıkıştırılan hava ivmelenme sırasında daha fazla tork elde etmek için silindir içerisine sürülmüştür. Bu sistemde değişken supap zamanlamalı sisteme göre tank supabı 46 mm yerine 16 mm, yay kuvveti ise 100 N yerine 340 N olarak tasarlanmıştır [38].

Sağır; 2006 yılında parça sayısı (kam, supap mekanizması, piston-biyel-krank mekanizması) daha az, yağ buharı dışında emisyonu olmayan, imalat maliyeti düşük ve içten yanmalı motorlara göre daha hafif paletli tip bir pnömatik motorun tasarımını ve performans deneylerini yapmıştır [39].

P Higelin, I Vasile, A Charlet and Y Chamaillard direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda hibrit basınçlı hava tahriki uygulaması gerçekleştirmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda yüksek basınçlı hava tankı ile irtibatlı bir doldurma valfi motorun silindir kapağı üzerine yerleştirilmiştir. Dolgu valfi için ilave bir kam mili yapılmış olup elektrik ile tahrik edilmektedir. Çalışmada hibrit basınçlı

hava tahrikli taşıtın laboratuvar koşullarında yol testleri yapılmıştır [40]. Şekil 6; direk enjeksiyonlu hibrit bir dizel-pnömatik motoru göstermektedir.



Şekil 6. Direkt enjeksiyonlu bir dizel motorun hibrit pnömatik tahriki

Huang, D. ve arkadaşları hibrit pnömatik sistemlerde içten yanmalı motorların egzoz gaz enerjisinin yeniden kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre hibrit pnömatik güç sistemlerinin egzoz gaz enerjisinin kullanılabilirliği geleneksel taşıtlara göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır [41].

Van Mierlo ve arkadaşları şehir içi otobüslerde hibrit pnömatik güç sistemlerinin verimliliğini araştırmışlardır. Buna göre şehir içi otobüslerin pnömatik hibrit teknolojisini kullanmaları durumunda enerji tüketimi ve emisyonların % 20-30 arasında azalabildiği sonucuna ulaşılmıştır [42].

Mercedes otomobil firması mühendislerinden Anglo Di Pietro basınçlı hava ile çalışan döner pistonlu bir motor tasarlamıştır. 2005 yılında testlerine başlanan motor günümüzde bazı fabrika içi yük ve personel taşımalarında, küçük boyutlu taşıtlarda kullanılmaktadır. Motorun hızı ve torku bir akış kelebeği vasıtasıyla basınçlı havanın basıncı ya da miktarı kontrol edilerek sağlanmaktadır.

Pnömatik paletli motorlar ile ilgili olarak bir çalışmada parça sayısı (kam, supap mekanizması, piston-biyel-krank mekanizması) daha az, yağ buharı dışında emisyonu olmayan, imalat maliyeti düşük ve daha hafif paletli tip basınçlı hava ile çalışan bir motor yapılmıştır [43].

Maghoub ve Craighead PID ve H-Bridge kontrol metotlarını pistonlu bir pnömatik motora uygulayarak basınçlı havanın silindire giriş ve çıkışını kontrol etmeye çalışmışlardır [44]. Pnömatik H-Bridge yöntemi motorların yön ve hız kontrolünü amaçlayan bir yöntem olma özelliğindedir. Sistem motorun çalışma aralığını düşük hız, orta hız ve yüksek hız olmak üzere üç kısma ayırmaktadır. Bu yöntemin düşük hızlarda uygulaması oldukça sınırlı kalmıştır. Bu durumun nedeni ise modelin düşük motor hızlarda doğrusallığının çok zayıf kalmasıdır.

Wang pnömatik motorların modellenmesi ve kontrolü üzerinde çalışmalar yapmıştır. Kontrol hacimleri süreksiz olan bu sistem için yaklaşık sürekli bir model türetilmiş, modelin doğruluğu simülasyon ve deneylerle gösterilmiştir. Daha sonra deterministik kontrol sistemi tasarım yöntemleri kullanılarak bir kontrol stratejisi belirlenmiş ve bu kontrol stratejisiyle bir profilin istenen doğrulukla izlenebildiği gösterilmiştir [45].

Ke ve arkadaşları pnömatik motorlar için enerjinin verimli kullanılmasını sağlayan bir kontrol sistemi geliştirmiştir. Çalışmada pnömatik tahrikli bir sistemin matematiksel modellenmesi yapılmış, denklemler lineerleştirilmiş ve optimum kontrol teorisi uygulanarak kontrol stratejisi belirlenmiştir.

Verilen başlangıç ve son durum şartlarına bağlı olarak enerji-optimum hız profilleri bulunmuştur [46].

Tokhi ve arkadaşları yapay sinir ağları yardımıyla radyal pistonlu pnömatik motorların modellenmesi ve kontrol edilmesi konusunda çalışmışlardır. Araştırmacılar pnömatik motorların H-Bridge yöntemine göre orta ve yüksek hız bölgelerindeki gösterdiği lineer davranışı kullanarak düşük hız bölgelerindeki non-linear eğilimi azaltmak için yapay sinir ağlarını kullanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre düşük hızlarda lineer davranış gösteren bir kontrolör geliştirmişlerdir [47].

Ping-lu Chen ve arkadaşları termodinamik ve mekanik teoriler kullanarak pnömatik motorlarda elektro-pnömatik supap uygulaması yapmışlardır. Simülasyon ve deney sonuçlarına göre elektro-pnömatik supabın maksimum çalışma frekansı yaklaşık 2000 1/min'e karşılık gelen 30 Hz'dir. Deneylerde sabit hacim deşarj metodu (constant volume discharge method) kullanılarak selenoid valfin efektif orifis alanı belirlenmiştir [48].

Pandian elektrik motorları ile pnömatik motorları aynı test koşullarında test ederek çeşitli analizler yapmıştır [49]. Elde edilen test sonuçlarına göre pnömatik motorların atalet/çıkış torku oranı düşüktür. Dolayısıyla pnömatik motorları çalıştırmak, istenilen hız değişiminin sağlamak ve durdurmak elektrik motorlarına göre daha kolaydır. Bu nedenlerden dolayı pnömatik motorların güç ve moment karakteristikleri elektrik motorlarına göre daha başarılıdır.

Tokhi [50], elektrik motorları ile pnömatik motorları mukayese ederek, pnömatik motorların enerji kaynağının temiz elde edilebilme potansiyeli, geniş erişim momenti-hız aralığı ve moment kontrolü bakımından daha avantajlı olduğunu ifade etmiştir. Bu avantajlarından farklı olarak pnömatik motorlar sürtünme sonucu oluşan ısı ve aşırı yüklenme sonucunda oluşabilecek hasarları da asgariye indirir.

Chang ve Nishi [51] alçak basınçlı bir paletli pnömatik motor çalışması yapmıştır. Pnömatik motorun statik ve dinamik performansları deneysel sonuçlardan ortaya çıkarılmıştır.

Yu-Ta Shen, Yean-Ren Hwang [52], paletli tip bir hibrit pnömatik motosiklet prototipi yapmış, performans deneylerini yaparak aynı motorda kullanılan içten yanmalı motosiklet ile karşılaştırma yapmıştır. Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında pnömatik motosikletin güç tüketimi 0,073 kW-h/km, içten yanmalı motosikletin güç tüketimi 0,127 kW-h/km olarak ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan motosikletin silindir hacmi 50 cm³ olup, dönüştürme işleminden sonra 7 kW gücündeki bir kompresörle hava tankı 75 saniyede doldurulabilmektedir. Motosikletin kat etmiş olduğu menzile ise 2 km olarak ölçülmüştür.

Pinglu Chen ve arkadaşları paralel hibrit-hava taşıtlarının UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), NEDC (New European Driving Cycle), HWFET (Highway Fuel Economy Test Driving Cycle) seyir çevrimine göre 67 kW gücündeki 1,9 L turbo dizel motorun simülasyonunu yapmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre NEDC çevrimine göre % 14,71, UDDS çevrimine göre % 16,75 ve HWFET çevrimine göre de % 5,04 yakıt ekonomisi sağlanmıştır [53].

Dönitz, C. ve arkadaşları "Dynamic Programming for Hybrid Pneumatic Vehicles" isimli makale çalışmalarında MVEG-95 sürüş çevrimine göre bir hibrit pnömatik motor simülasyonu yapmışlardır. 4 zamanlı pnömatik çevrimi dikkate alınarak yapılan hibrit simülasyon çalışmasının sonuçlarına göre yakıt tüketiminin % 34 azaldığı ifade edilmiştir [54].

Zhenggang Xu ve Xiaopeng Xie pnömatik motorlarında egzoz gaz basıncını azaltarak doldurma verimini geliştirmeye çalışmışlardır. Bu amaçla egzoz basınç sensörü, fotoelektrik enkoder, emme selenoid valfi ve egzoz selenoid valfinden oluşan bir sistem ile egzoz basıncı ve krank açısına göre

supap zamanlamaları kontrol edilmeye çalışılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre bu kontrol sistemi kullanılarak egzoz basıncı atmosfer basıncına kadar düşürülebilmekte ve enerji kayıpları azaltılabilmektedir [55].

Barth ve arkadaşları tarafından bir katalizör tarafından ayrıştırılan yakıttan elde edilen gazların kullanıldığı pnömatik bir tahrik sisteminin modelleme ve kontrolü yapılmıştır [56].

Kunt; pistonlu tek silindirli 4 zamanlı 400 cc içten yanmalı motorunu döner supap mekanizması kullanarak pnömatik motora dönüştürmüş ve performans deneylerini yapmıştır. 30 bar çalışma basıncına kadar yapılan performans deneylerine göre pnömatik motorun düşük motor hızlarında içten yanmalı motorlara nazaran daha yüksek motor momenti elde ettiği, sistemin egzoz sisteminin boşaltma konusunda geliştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir [57].

Güneş, pistonlu tek silindirli 2 zamanlı 40cc içten yanmalı motoru elektromekanik doğrusal supap kullanarak pnömatik motora dönüştürmüştür. Elektromekanik supap yüksek motor devirlerinde bobinin yeterli doyumluğa ulaşamaması sebebiyle yeterli performansı gösterememiştir [58].

Hibrit pnömatik motorlarda depolanan basınçlı hava motor aksesuarlarının çalıştırılmasında da kullanılabilir. Yüksek motor hızlarında motordan enerji yutan aksesuarların enerji ihtiyaçlarının yedek bir pnömatik motor tarafından karşılanmasına yönelik bazı araştırmalar mevcuttur [59-60].

Hibrit pnömatik motorlarda depolanan basınçlı hava motorun süpersarj ile beslenmesinde de kullanılabilir. Düşük motor hızı ve yüklerde verimleri düşük tipik süpersarjlı motorların aksine hibrit pnömatik motorlar her çalışma noktasında yüksek verimle süpersarj ile beslenebilirler [28, 60-62].

Haisheng Chen ve arkadaşları pnömatik motorlarda sıkıştırılmış hava ve sıvı havanın motor performansına etkisini incelemiştir. Sıvı havanın volümetrik enerji yoğunluğu daha fazla olmasına rağmen sıkıştırılmış hava ile tahrik edilen deney motorunun verimi daha yüksek bulunmuştur. Bu durumun nedeni havanın sıvılaşması sürecinde enerji tüketiminin yüksek olmasıdır [63].

Karayolu taşımacılığı yapan araçlarda pnömatik motor uygulamaları bulunmaktadır. Pnömatik motor teknolojisinin veriminin yüksek olması, ve emisyon üretmemesi hidrojen yakıt teknolojisi ve batarya-elektrik teknolojisine göre gelecekte daha fazla kullanılabileceğini göstermektedir [64-65].

2.1. Pnömatik Motorlarının Kullanım Alanları

Pnömatik motorların günümüzde kullanım alanları ile ilgili yapılan araştırmalarda enerjinin depolanması, motosiklet, toplu taşıma, malzeme ve personel taşıma gibi pek çok uygulamasının bulunduğu görülmüştür.

Pnömatik sistemlerinin en önemli özelliklerinden birisi depoladığı enerji miktarını uzun süre saklayabilmesidir. Elektrik enerjisinin depolanabilmesi konusundaki sıkıntılar nedeniyle pnömatik sistemler bu konuda rahatlıkla kullanılabilir. Üretilen elektrik enerjisinin bir kompresör sistemini beslemesiyle elde edilen basınçlı havanın yer altındaki mağaralarda depolanması dolaylı olarak elektrik enerjisinin depolanması anlamına gelmektedir. Enerjinin bu şekilde depolanması önemli hidroelektrik potansiyeli bulunan ülkemiz için oldukça önemlidir. Ayrıca basınçlı hava kullanarak sabit tesislerde ihtiyaç durumunda elektrik üretme amacıyla pnömatik motorlar kullanılabilir.

Pnömatik motorların bir diğer kullanım alanı kısa mesafelerde kullanılan pnömatik motosikletlerdir. Bu motosikletler basit düzenlemeler ile pnömatik motorlara dönüştürülebilmektedirler. Bu motosikletlerin yaygınlaşması durumunda şehir içi araç trafik yoğunluğu, emisyonları ve gürültüsü azalacaktır. Pnömatik motosikletlerin ülkemizde kullanılabilme potansiyeline bakıldığında oldukça önemli bir emisyon azalması meydana gelecektir. Tayvan çevre ajansının araştırmalarına göre 50 cc' lik 2 zamanlı bir motosiklet kat ettiği 1 km mesafe için standart bir otomobile göre 2,7 kat daha fazla CO, 6,7 kat daha fazla HC emisyonu üretmektedir. Yine aynı araştırmaya göre 125 cc' lik 4 zamanlı bir motosiklet, standart bir otomobile göre 2,4 kat CO ve 3,1 kat daha fazla HC emisyonu üretmektedir [66].

Pnömatik motorların bir diğer kullanım alanı da toplu taşıma araçlarıdır. Başarılı bir susturucu sistemi ile bu motorlar şehir içi toplu taşımasında oldukça kullanılabilirler. Çevre dostu bu taşıtların yaygınlaşması halinde yine şehir içi araç yoğunluğu, emisyonları azalacaktır.

Meksika ve bazı güney Amerika ülkelerinde pnömatik motor kullanan taksilere rastlanmıştır. Sadece Meksika için bu sistemi kullanan araç sayısı 200 000 'in üzerindedir.

Pnömatik motorlar kapalı mekanlarda yapılan depolama, personel taşıma gibi hizmetlerde de kullanılabilir. Kapalı alanlarda emisyonların oluşmasını engelleyen, yanma meydana getirmeyen bu motorlar gıda, kimya, rafineri ve silah fabrikaları gibi tesislerde kullanılabilme potansiyeli bulunmaktadır.

2.2. Pnömatik Motorların Avantajları

- Pnömatik teknolojisi taşıt üretim maliyetini %20 azaltır. Sistemde yakıt tankı, ateşleme sistemi, soğutma sistemi bulunmamaktadır.
- Sistemin mekanik tasarımı basit ve güçlüdür.
- Bakım maliyetleri düşüktür.
- Taşıt ağırlığının azaltılmasıyla daha uzun menzile ulaşılabilir.
- Taşıt deposunun evlerde doldurulması durumunda dolum süresi yaklaşık 4-5 saat sürerken doldurma maliyeti ise yarıya düşmektedir [67].
- Sistem içten yanmalı motorlara uygulanabilmektedir.
- Yüksek basınçlı hava tankının tahrik ettiği motor çalıştırma anından itibaren moment üretebilmektedir. Basınçlı hava tankı sistemi yeterli basınçla beslediği sürece krank mili üzerinde her zaman potansiyel enerji mekanik enerjiye dönüştürülebilmektedir.
- Kullanılan basınçlı hava alevlenmeyen bir yapıya sahiptir.
- İçten yanmalı motorlara sahip taşıt bataryalarının meydana getirdiği korozyon etkileri ortadan kalkmıştır.
- Pnömatik motorlarda kullanılan basınçlı hava depoları bataryalara nazaran daha uzun ömürlüdür.
- Pnömatik motorlarda kullanılan basınçlı hava depolarının geri dönüşümü bataryalara nazaran çevreyi daha az kirletmektedir.
- Güç/Ağırlık oranı yüksek, çevresel zararları düşüktür [68]. Güç yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle aynı güç için pnömatik motorların elektrik motorlarına göre boyutları daha küçüktür [69].
- Fosil kökenli yakıt taşıyan taşıyıcılardaki ölümcül kazalara neden olabilen tehlikeli yangın kazalarını ortadan kaldırır.
- Çevre sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda çalışabilir.
- Pnömatik için kabul edilebilir sınırlar dahilinde olmak koşuluyla sonsuz değişkenlikte güç karakteristikleri elde edilebilmektedir.
- Pnömatik motorların hibrit uygulamaları da mevcuttur.

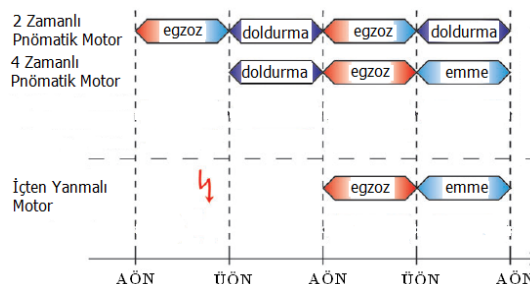
- Hibrit basınçlı hava sistemlerinde kullanılan içten yanmalı motorlar oldukça az miktarda CO, HC üretirler.
- Egzoz akışkanını yeniden kullanabilmeleri sebebiyle termik verimleri yüksektir.
- Hibrit uygulamalarda içten yanmalı motor en verimli çalışabildiği devir sayısında çalıştırıldığı için gürültü, ateşleme, emme ve egzoz problemleri büyük ölçüde çözülmektedir.
- Hibrit uygulamalarda içten yanmalı motorun sabit devir sayısında çalıştırılması sebebiyle en düşük yakıt tüketimi elde edilmektedir. Özgül yakıt tüketimi taşıtın üzerindeki yükün değişmesi durumunda değişmemektedir.
- Silindir içerisinde yanma reaksiyonlarının olmamasından dolayı termal korozyon meydana gelmez. Bu nedenle daha az bakım gerektirir.
- Pnömatik motorlar elektrik motorlarında ihtiyaç duyulan aşırı yük koruma, manyetik starterlere ihtiyaç duymamaktadır [70].
- Gıda, boya, ilaç ve silah sanayi gibi alanlarda personel, yük gibi işlerde rahatlıkla kullanılabilir [71-79].
- Taşıdığı enerji miktarı olarak sıkıştırılmış hava benzinden yaklaşık 10 kat daha fazla enerji taşımaktadır (Sıkıştırılmış hava=320 kJ/l, Benzin=33,33 kJ/l) [80].

2.3. Pnömatik Motorlarının Dezavantajları

- Hava sıkışabilmesi sebebiyle hava motorunun hızının sabitlenmesinde zorluklar yaşanabilmektedir.
- Egzoz yapılan gaz atmosfere atıldığı için hava sarfiyatı fazla olmaktadır.
- Hız ve hassas konum kontrolü bakımından zayıftırlar.
- Sistemde kullanılan havanın bünyesindeki nem dışarıya verimli bir şekilde atılmaması durumunda sistemde paslanmalar meydana gelmektedir.
- Basınçlı havanın genişlemesi hava sırasında gaz kanunları gereği soğuyacaktır. Bu durumun önlenmesi için basınçlı havanın çevre sıcaklığına ısıtılması gerekir. Isıtma işlemi ise silindir içerisinde neme sebep olacaktır.
- Basınçlı hava tanklarının çabuk doldurulması durumunda tank ısınacaktır. Isınmayı önlemek için hava tanklarının suya daldırılması gerekmektedir. Bu işlemi araç üzerinde yapmak olanaksızdır.

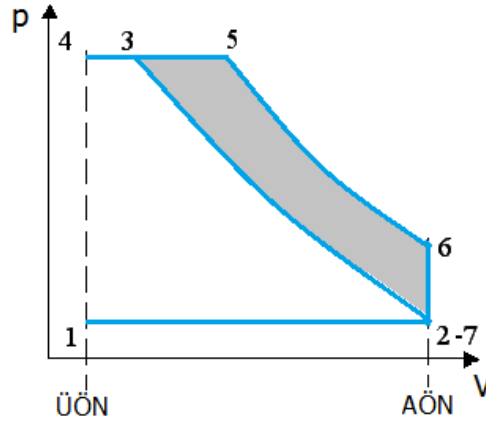
2.4 Çevrimlerine Göre Pnömatik Motorlar

Çevrimlerine göre pnömatik motorlar iki ve dört zamanlı pnömatik motorlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İki zamanlı pnömatik motorun çalışmasında doldurma ve egzoz zamanları bulunmaktadır. Pistonun ÜÖN' dan AÖN' ya hareketi sırasında doldurma zamanı gerçekleşmekte, AÖN' dan ÜÖN' ya hareket sırasında ise egzoz işlemi meydana gelmektedir. Dört zamanlı pnömatik motorun çalışmasında ise emme, sıkıştırma, doldurma ve egzoz işlemi bulunmaktadır. Şekil 9; 2 ve 4 zamanlı pnömatik motorlarının içten yanmalı motorlarla çevrim zamanları bakımından kıyaslanmasını göstermektedir.



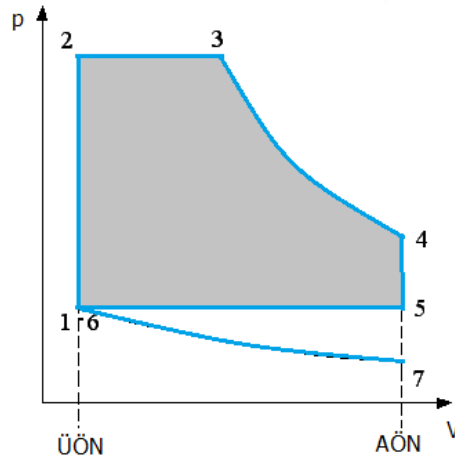
Şekil 9. Pnömatik motorlar ile içten yanmalı motorların çevrimlerine göre kıyaslanması

Şekil 10; 4 zamanlı pnömatik çevrimine ait p-V grafiğidir. Bu çevrime göre krank milinin iki dönüşünde bir iş elde edilmektedir. Bu çevrimde 1-2 aralığında motora doğal emişli motorlar gibi hava emilmektedir.

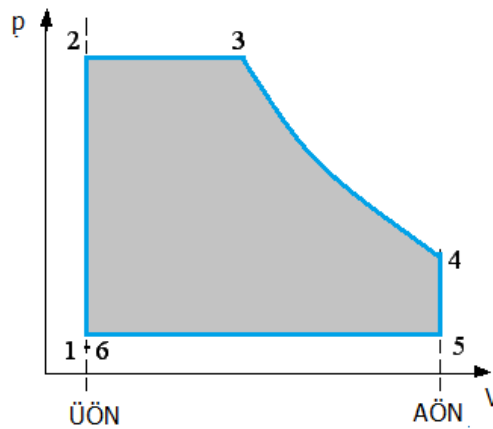


Şekil 10. Dört zamanlı pnömatik motor çevrimi (Doğal Emişli)

Şekil 11; 4 zamanlı pnömatik çevrimine ait p-V grafiğidir. Bu çevrimde de krank milinin iki dönüşünde 1 iş elde edilmektedir. Bu çevrimin diğer 4 zamanlı pnömatik çevrimden farkı silindir içerisine doğal emişli motorlarda olduğu gibi emme havasının alınmamasıdır.

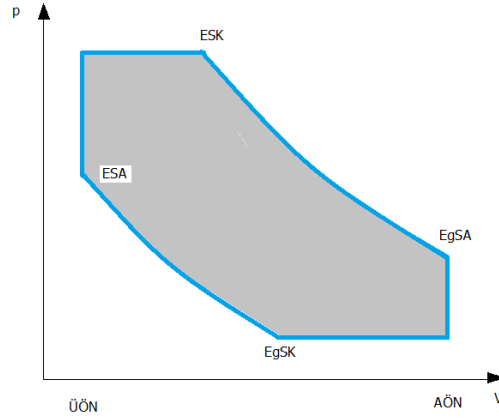


Şekil 11. Dört zamanlı pnömatik motor çevrimi (Kayıp Zamanlı)



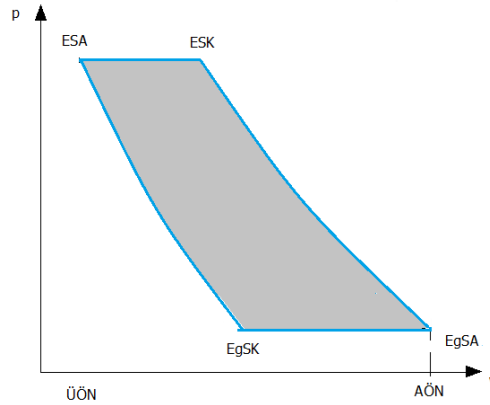
Şekil 12. İki zamanlı pnömatik motor çevrimi

Şekil 12 2 stroklu pnömatik motorun p-V grafiği görülmektedir. Bu grafik 4 zamanlı pnömatik motor çevrimine oldukça benzemektedir. Bu çevrimde diğer çevrimde bulunan 6-7-1 aralığı bulunmamaktadır. Ayrıca bu çevrimde krank milinin 1 dönüşünde çevrim işi elde edilmektedir.



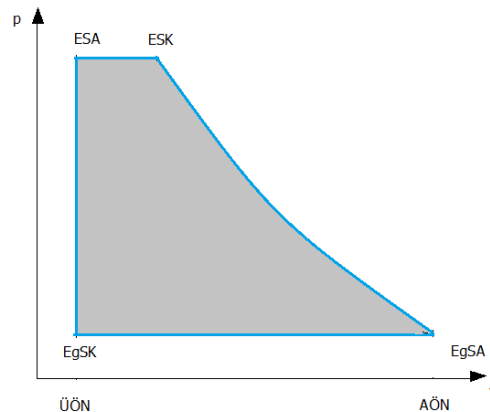
Şekil 13. Chun Tai'nin pnömatik motor çevrim

Şekil 13'te verilen p-V diyagramı Chun Tai tarafından ifade edilmiştir [34]. Bu grafiğe göre çevrime iki aralıkta (ESA-ESK) basınçlı hava verilmekte, genişleme ve egzoz işlemleri adyabatik olarak gerçekleşmekte, iki aralıkta da (EgSA-EgSK aralığı) egzoz işlemi gerçekleşmektedir.



Şekil 14. Magnus Andersson'un pnömatik motor çevrimi

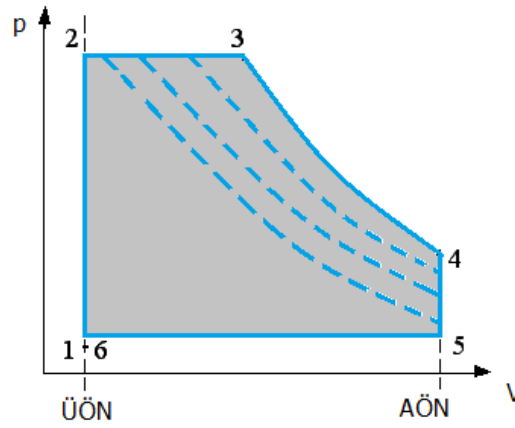
Şekil 14'te verilen p-V diyagramı ise Magnus Andersson, Bengt Johansson and Anders Hultqvist tarafından ifade edilmiştir [80]. Bu çevrime göre iki aralıkta basınçlı hava verilmekte, genişleme ve egzoz işlemleri adyabatik olarak gerçekleşmekte, bir aralıkta da egzoz işlemi gerçekleşmektedir.



Şekil 15. Schechter'in pnömatik motor çevrimi

Şekil 15'deki p-V diyagramı ise Michael M. Schechter tarafından ifade edilmiştir [33]. Çevrimde ESA-ESK aralığında sisteme basınçlı hava verilmekte, adyabatik genişleme sağlandıktan sonra EgSA-EgSK aralığında egzoz işlemi gerçekleşmektedir.

Şekil 16'da ideal bir basınçlı hava tahrikinin p–V diyagramı görülmektedir. Basınçlı hava çevrimi silindirin basınçlı hava ile doldurulması, genişleme işinin elde edilmesi ve egzoz akışkanının dışarı atılması olmak üzere temelde üç aşamadan meydana gelmektedir. Çevrim krank milinin bir tam tur dönmesi ile tamamlanmaktadır. Bu bakımdan iki zamanlı motorlara benzemektedir. İki zamanlı motor esasına göre çalışan basınçlı hava motorları düşük sürtünme kayıpları ile yüksek motor momenti elde edilmesini sağlarlar. Pnömatik motorların elde ettiği net iş alanı emme supabının kapanma zamanına bağlı olarak değişmektedir. Kapanma zamanlamasına bağlı olarak net iş alanındaki değişim aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Düşük yük durumlarında 2 ve 3 noktaları üst üste gelebilmektedir.



Şekil 16. İdeal pnömatik motor çevrimi

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Pnömatik motorlar herhangi bir yakıt türüne bağımlı olmamaları, sıkıştırılmış havanın enerjisini verimli bir şekilde depolayabilmeleri, kolay kumanda edilebilmeleri ve egzoz akışkanını yeniden kullanabilmeleri sebebiyle geleceğin önemli alternatif enerji dönüştürücülerinden biridir. Sistem doğrudan içten yanmalı motorlara uygulanabilmekle birlikte hibrit uygulamalarda mevcuttur. Pnömatik motorların oldukça az emisyonlar üretmesi, kullanılacak basınçlı havanın kolaylıkla elde edilebilmesi, enerjinin uygun bir maliyetle elde edilmesi diğer avantajları arasında yer almaktadır. Sistemin şehir hatlarında kullanılan akımlarla doldurulabilmesi de mümkündür. İfade edildiği gibi gerek taşıt için gerekse de çevre için çok önemli yararları bulunan pnömatik motorların yaygınlaşmasını zorunlu kılmaktadır.

Ateşleme bobini, buji, soğutma donanımı gibi motorlarda üretim maliyetinin arttıran maliyetler pnömatik motorlarda bulunmamaktadır. Ayrıca egzoz çıkış sıcaklıkları dikkate alındığında taşıt üzerinde istenildiğinde kabin içi soğutmaya da yardımcı olabilmektedir. İçten yanmalı motorlarla mukayese edildiğinde içten yanmalı motorlardan daha düşük devirlerde moment üretebilen pnömatik motorların motor hızının sabitlenmesinde yaşanan zorluklar, hava içindeki nemin paslandırma etkisi ve hassas konumlama konusunda yaşadıkları sıkıntılara pnömatik motorların üzerinde çalışılması gereken zorluklarıdır.

Çalışmada sözü edilen basınçlı hava, elektrik enerjisi ile çalışan kompresörler tarafından sağlanmaktadır. Ülkemiz önemli miktarlarda hidroelektrik potansiyeline sahiptir. Birim elektrik maliyetleri göz önüne alındığında elektrik üretimi yapan santrallerde en ucuz elektrik üretimi hidroelektrik santrallerinde yapılmaktadır. Yapılabilir hidroelektrik potansiyelinin % 35 ini

kullanabilen ülkemizde elektrik üretiminin hidroelektrik santralleri yoluyla yapılması enerjide dışa bağımlılığı önemli miktarlarda azaltması muhtemeldir. Üretilen elektrik enerjisinin basınçlı hava formunda depolanması, depolama sıkıntısı bulunan elektrik enerjisi için oldukça verimli bir çözümdür.

KAYNAKLAR

- 1- J. Romm, The car and fuel of the future, Energy Policy, Article, 2006, 34, 2609-2614.
- 2- T. Sağır, Pnömatik Motor Tasarımı ve Prototipinin İmalatı, Y.lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006, 1-5, Anlara.
- 3- N. Kahraman, S.O. Akansu, Otto motorlarına LPG dönüşümü yapılmasının ekonomik analizi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1997, 1,105-109.
- 4- W.Vorst, J.G. Finegold, Automotive hydrogen engines, and onboard storage methods, Hydrogen Energy Fundamentals, Miami Beach, 1975, Florida.
- 5- N. Kahraman, S. Akansu, B. Albayrak, İçten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak hidrojenin kullanılması, Mühendis ve Makine, 2005, 48, 9-15.
- 6- H.R. Martin, D. Mcloy, The control of fluid power, 1973, 1-187.
- 7- www.freepatentsonline.com/4311084.html, V. P. Richard, Pneumatic Engine, 2007.
- 8- www.freepatentsonline.com/3885387.html, G. J. Simington, Air Drive Adaptor, 2007.
- 9- www.freepatentsonline.com/4102130.html, H. C. Stricklin, Converting an Internal Combustion Engine to a Single Acting Engine Driven by Stream or Compressed Air, 2007.
- 10- www.freepatentsonline.com/4337842.html, R. P. Spangler, Vehicle Powered by Air Pressure Engine, 2007.
- 11- www.freepatentsonline.com/4124978.html, İnternet: W. C. Wagner, "Compressed Air Engine", 2007.
- 12- www.freepatentsonline.com/4018050.html, J. F. Murphy, Compressed Air - Operated Motor Employing Dual Lobe Cams, 2007.
- 13- www.freepatentsonline.com/20030209013.html, T. Yu-Chi, Piston Air Engine, 2007.
- 14- www.freepatentsonline.com/4651525.html, L. G. Cestero, Piston Reciprocating Compressed Air Engine, 2007.
- 15- www.freepatentsonline.com/4355508.html, S. J. Blenke, Air Power Motor, 2007.
- 16- www.freepatentsonline.com/6006519.html, J. V. Hormell, Compressed Air-Powered Engine, 2007.
- 17- C. Knowlen, A.T. Mattick, A. P. Bruckner, A. Hertzberg, High efficiency energy conversion system for liquid nitrogen automobiles, Society Automotive Eng, Paper, 1998, No 981898.
- 18- www.aa.washington.edu/aerp/CRYOCAR/homepage/index.htm, LN 2000, The University of Washington's Liquid Nitrogen Propelled Automobiles, 2006.
- 19- S. Sahu, Some Feasibility Investigations on Pneumatic Primemover for a Small Vehicle, M.S(r) thesis, Mechanical Eng. Department, 2000, 10-15, Delhi.
- 20- www.theaircar.com, Moteur Development International (MDI), 2008.
- 21- C. Knowlen, A.T. Mattick, H. Deparis, A. Hertzberg, Quasi-isothermal expansion engines for liquid nitrogen automotive propulsion, Society Automotive Eng, Paper, 1997, No. 972649.
- 22- C. Knowlen, A. T. Mattick, A. P. Bruckner, A. Hertzberg, High-efficiency energy-conversion systems for liquid-nitrogen automobiles, Society Automotive Eng., 1998, Paper No. 981898.
- 23- www.zevcat.com/media/MDI_History.pdf, 2007.
- 24- K David Huang, T. Sheng-Chung, M. Wei-Ping, C. Wei-Chuan, Hybrid pneumatic-power system which recycles exhaust gas of an internal-combustion engine, Applied Energy, 2005, 82, 117-132.
- 25- K. David Huang, T. Sheng-Chung, C. Wei-Chuan, Energy-saving hybrid vehicle using a pneumatic-power system, Applied Energy, 2005, 81, 1-18.

- 26- X. Wang, T. Tsao,; C. Tai, H. Kang, P. Blumberg, Modeling of compressed air hybrid operation for a heavy duty diesel engine, *J. Eng. Gas Turbines Power Trans*, 2009, 131, 052802:1–052802:8.
- 27- M. Schechter, Regenerative compression braking-a low cost alternative to electric hybrids, *SAE Paper*, 2000, 01-1025.
- 28- P. Higelin, A. Charlet, Y. Chamaillard, Thermodynamic simulation of a hybrid pneumatic-combustion engine concept, *International Journal of Applied Thermodynamics*, 2002, 5, 1-11, ISSN 1301 9724.
- 29- I. Vasile, P. Higelin, A. Charlet, and Y. Chamaillard, Downsized engine torque lag compensation by pneumatic hybridization, in *13th International Conference on Fluid Flow Technologies*, 2006.
- 30- P. Higelin, I. Vasile, A. Charlet, and Y. Chamaillard, Parametric optimization of a new hybrid pneumatic combustion engine concept, *Int. J. Engine Res.*, 2004, vol. 5, no. 2, pp. 205–217.
- 31- H. Kang, C. Tai, X. Wang, T.-C. Tsao, P. N. Blumberg, and J. Stewart, Demonstration of air-power-assist (APA) engine technology for clean combustion and direct energy recovery in heavy-duty application, *SAE*, 2008 Paper 2008-01-1197.
- 32- S. Trajkovic, P. Tunestal, and B. Johansson, Investigation of different valve geometries and valve timing strategies and their effect on regenerative efficiency for a pneumatic hybrid with variable valve actuation, *SAE Paper*, 2008, 01-1715.
- 33- M. M. Schechter, New cycles for automobile engines, *Society Automotive Eng*, 1999, 01-0623.
- 34- C. Tai, T. C. Tsao, Using camless valvetrain for air hybrid optimization, *Society Automotive Eng*, 2003, 01-0038.
- 35- A. Fazeli, A. Khajepour, C. Devaud, A novel compression strategy for air hybrid engines, *Applied Energy*, 2011, 88, 2955–2966.
- 36- W. Ochel, O. Beyerman, F. Gehrman, Multicylinder 4-stroke cycle diesel engine and compressor, 1954, US Patent 2676752.
- 37- S. Trajkovic, A. Milosaljevic, P. Tunestal, B. Johansen, FPGA controlled pneumatic variable valve actuation, *Society Automotive Eng*, 2006, 01-0041.
- 38- S. Trajkovic, P. Tunestol, B. Johansen, Introductory study of variable valve actuation for pneumatic hybridization, *Society Automotive Eng*, 2007, 01-0288.
- 39- T. Sağır, Pnömatik Motor Tasarımı ve Prototipinin İmalatı, Y.lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006, 1-5, Ankara.
- 40- P. Higelin, I. Vasile, A. Charlet, Y. Chamaillard, Parametric optimization of hybrid pneumatic-combustion engine concept, *Int. J. Eng. Res.*, 2003, 5 (2), 205–217.
- 41- D. Huang, V.Quang, K. Tseng, Experimental study of exhaust gas energy recycling efficiency of hybrid pneumatic power system, *International Journal of Energy Research*, *Int. J. Energy Res.*; 2009, 33, 931-942.
- 42- J. Van Mierlo, G. Maggetto, P. Lataire, Which energy source for road transport in the future a comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles, *Energy Conversion and Management*, 2006, 47, 48-60.
- 43- www.aircaraccess.com/articl01.htm, Pneumatic Options Compressed Air's Ultimate Secret, 2006.
- 44- H. M. Mahgoub, I. A. Craighead, Development of a microprocessor-based control system for a pneumatic rotary actuator, *Mechatronics*, 1995, 5, 541–60.
- 45- J. Wang, Modelling study and servo-control of air motor systems, *International Journal Control*, 1998, 3, 459-476.
- 46- J. Ke, K. Tharapalan, J. Wang, H. Wu, Development of energy efficient optimal control for servo pneumatic cylinders, *Control 2004*, University of Bath, UK, 2004, 119.
- 47- M. O. Tokhi, I. N. Reynolds, M. Brisland, Real time control of a radial piston air motor, *IFAC World Congress*, 2002, Barcelona.
- 48- C. Ping-lu, Y. Xiao-li, L. Lin, Simulation and experimental study of electro-pneumatic valve used in air-powered engine, *Journal of Zhejiang University Science A*, 2009, 10 (3), 377-383.

- 49- S. R. Pandian, Control performance of an air motor, In: IEEE proceedings of the 1999 international conference on robotics and automation, 2003, 518–24, Detroit, Michigan.
- 50- M. O. Tokhi, M. Al-Miskiry, Briland M. real time control of air motors using a pneumatic H-bridge, *Control Eng Pract*, 2001, 9, 449–57.
- 51- Y. Chang, A. Nishi, Low-pressure air-motor for wall-climbing robot actuation, *Mechatronics*, 2003, 13, 377–92.
- 52- S. Yu-Ta, H. Yean-Ren, Design and implementation of an air-powered motorcycles, *Applied Energy*, 2009, 86, 1105–1110.
- 53- C. Pingu, Y. Xiaoli, N., F.Xianghong, Yidong, Modelling and simulation analysis on parallel hybrid air-fuel vehicle, *Energy Power Engineering*, DOI 10.1007/s11708-010-0008-y, China.
- 54- C. Dönitz, J. Vasile, C. Onder, L. Guazzella, Dynamic programming for hybrid pneumatic vehicles, *American Control Conference*, 2009, 97-474-244-524-0/09, St. Louis, MO, USA.
- 55- Z. Xu, X. Xie, A Method for reducing exhaust pressure of vehicle compressed air powered engine, *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2012, 978-1-4244-2693-5/09, China.
- 56- E. J. Barth, M. A. Gogola, M. Goldfarb, Modelling and control of a monopropellant based pneumatic actuation system, *IEEE International Conference on Robotics&Automation*, 2003, 628-633, Taipei, Taiwan.
- 57- M. A. Kunt, Pistonlu bir motorun basınçlı hava motoruna dönüştürülmesi ve performans analizi, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2011, 13-19, Ankara.
- 58- H. Güneş, Bir pnömatik motor kontrol sisteminin teorik ve deneysel analizi, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2012, 21-25, Ankara.
- 59- Ali I, Yang K, Kim S. E3 system - a two speed accessory belt drive system for reduced fuel consumption. *Society of Automotive Engineers*, 2008, 01-1521.
- 60- Donitz C, Vasile L, Onder C, Guzzella L. Modelling and optimizing two- and four-stroke hybrid pneumatic engines. *Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng*, 2009, 223(2):255–80.
- 61- Voser, C.; Donitz, C.; Ochsner, G.; Onder, C.; Guzzella, L., In-cylinder boosting of turbocharged spark-ignited engines Part 1: Model-based design of the charge valve, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Autom. Eng.*, 2012, 226, 1408–1418.
- 62- Voser, C.; Ott, T.; Donitz, C.; Vasile, I.; Onder, C.; Guzzella, L., In-cylinder boosting of turbocharged spark-ignited engines Part 2: Control and experimental verification, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Autom. Eng.*, 2012, 226, 1564–1574.
- 63- Haisheng C., Yulong D., Yangliang L., Xinjing Z., Chuqing T., Air fuelled zero emission road transportation: A comparative study, *Applied Energy*, 2011, 88:337-342.
- 64- Chen H., Cong TN., Yang W., Tan C., Li Y., Ding Y., Process in electrical energy storage system-a critical review, *Prog. Nat. Sci.*, 2009, 19(3):291-312.
- 65- www.efcf.com/reports/E18.pdf, Mazza P., Hammerschlag R., Wind-to-wheel energy assesment, *European Fuel Cell Forum*, 2009.
- 66- www.epa.gov.tw; Taiwan EPA, 2007.
- 67- www.yale.edu/globalist, Global 21 ,How Green Are Green Cars?, 2006.
- 68- S. R. Pandian, Control performance of an air motor, *International Conference on Robotics and Automation*, 1999, 518-524, Detroit.
- 69- A. L. Hitchcox, Performance insurance for air motors, *Hydraulics & Pneumatics*, 1995, 48 (10), 63-68.
- 70- *Automation Air Motors, Air motor flow control system—development project*, Automation Air Motors Ltd., 1998, Barnsley, UK.
- 71- J. Mahanay, Gerotor air motor: new motion for low-speed output, *Machine Design*, 1986, 58, (3), 75-77.
- 72- G. Morgan, Motors that run on air, *Power Transmission Design*, 1984, 26 (9), 35-38.
- 73- I. N. Reynolds, Modelling and control of an air motor, *MSc Dissertation, Department of Automatic Control and Systems Engineering, The University of Sheffield*, 2000, UK..

- 74- M. H. Saheed,. Neural and genetic modelling control and real time finite simulation of flexible manipulator, PhD Thesis, Department of Automatic Control and System Engineering, The University of Sheffield, 2000, UK..
- 75- J. S. Shamma, M. Athans, Potential hazards and possible remedies, IEEE Control Systems Magazine, 1992, 12 (3), 101–107.
- 76- R. W. Simnett, E. Anderson, Air motor drives for small pumps, Chemical Engineering, 1983, 90 (25), 73-75.
- 77- J. L. Cai, X. L. Yu, G. J. Yuan, Y. M. Shen,. Influence of port timing on work process of air-powered engine, Journal of Zhejiang University, 2004, 38(1), 65-69, Chinese.
- 78- C. Q. Zuo, Y. J. Qian, D. An, M. G. Ouyang, F. Y. Yang., Experimental study on air-powered engine. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4), 93-97, Chinese.
- 79- M. Manish, P. P. Rathod, S. S. Arvind, Study and development of compressed air engine-single cylinder ‘an experiment set up, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 2012, 1, 131-132.
- 80- M. Andersson, B. Johansson, A. Hultqvist, An air hybrid for high power absorption and discharge, Society Automotive Eng, 2005, 01-2137.