

MOBİL UYGULAMALAR İÇİN VERİMLİ ELEKTRO HİDROLİK SİSTEM

Eren UĞURLU

ÖZET

Günümüzde her sektörde yüksek verimlilikli ve sürdürülebilir sistem tasarım çalışmaları son derece hızlı bir şekilde ilerlemektedir. Her bir sektör yüksek enerji maliyetleri nedeniyle önceliğine verimliliğini almakta ve bu konuda gelişen elektrifikasyon teknolojilerini de kullanarak sektör rakiplerine avantaj sağlama bakış açısıyla çalışmalar yapmaktadır. Son dönemde özellikle Mobil İş Makinelerine de baktığımızda düşük maliyetli ve düşük enerji verimliliğine sahip geleneksel tasarımlar yerine yüksek enerji verimlilikli, düşük emisyon kabiliyetli ve elektrifikasyonun ön plana çıktığı tasarımlar yerini almaktadır.

Bu çalışmada yüksek verimliliğe sahip elektro hidrolik bilemler ile geleneksel sistemlere ait tasarımlar arasındaki enerji tasarrufu, verimlilikleri ve çevresel duyarlılığı açısından farkları ele alınmış olup bu durumun hem sektör imalatçalarına hem de son kullanıcılara avantaj sunacağı noktalar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dijital Yer Değiştirme, Verimlilik, Elektrifikasyon, Mobil Hidrolikler, Elektro-Hidrolikler.

ABSTRACT

Today, the design of high-efficiency and sustainable systems is rapidly advancing across all sectors. Due to high energy costs, each sector prioritizes efficiency and, by leveraging emerging electrification technologies, aims to gain a competitive advantage. In recent years, especially in the field of Mobile Work Machines, there has been a clear shift from traditional designs—characterized by low cost and low energy efficiency—toward designs that emphasize high energy efficiency, low emissions, and electrification.

This study examines the differences between traditional system designs and those using highly efficient electro-hydraulic components in terms of energy savings, overall efficiency, and environmental sensitivity. The advantages of such systems for both manufacturers and end users are also analyzed.

Key Words: Digital Displacement, Efficiency, Electrification, Mobile Hydraulics, Electro-Hydraulics.

1. GİRİŞ

Mobil hidrolik sistemler, 20. yüzyılın başlarından bu yana ağırlıklı olarak dizel motorlarla tahrik edilmektedir. Ancak artan çevresel kaygılar, özellikle iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında emisyonların azaltılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, inşaat ve iş makineleri gibi off-highway araçlarda fosil yakıtlardan uzaklaşmak ve enerji verimliliğini artırmak, sektör için önemli bir hedef haline gelmiştir.

“IEA senaryolarına göre verimlilik odaklı önlemler, 2030’a kadar gerçekleşmesi beklenen tüm enerji kaynaklı CO₂ emisyon azaltımının yaklaşık %33’ünde etkili olabilir.” [1].

Tablo 1. IEA senaryolarına göre CO₂ Seviyeleri [1].

Yıl	Global CO ₂ Emisyonları (energy-related)	Verimlilikle Azaltılan Emisyonlar	Yüzde (%)
2010–2023	~30–35 GtCO ₂ /yıl	~6–7 GtCO ₂	~20 %
2024–2030	Projeksiyonlar	Verimlilik katkısı	~33 %

Uluslararası Enerji Ajansı'nın da katkıda bulunduğu çalışmalara göre, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %37'sinin verimlilik iyileştirmeleriyle azaltılması gerekmektedir. Ancak günümüzde yaygın olarak kullanılan konvansiyonel hidrolik sistemler %30–40 aralığında verimlilik sağlarken, bu sistemlere güç veren dizel motorlar da yalnızca %40 civarında verimlidir. Bu durum, ağır iş makinelerinde toplam sistem veriminin %16'nın altında kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca egzoz gazlarında bulunan ince partiküller ve azot dioksit gibi bileşenlerin, halk sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir [1].

Motor Tipi	Termal Verimlilik (%)
Tipik ağır iş makinesi dizel motoru	~30–35 %
Geniş kabullerle üst sınır (teknik)	~30–40 %
Büyük gemi-makine tipi motorlar	~45–55 %
Laboratuvar/ARA-TEZ geliştirilen örnek motorlar	~50 % μ (%49,9)

$$\eta_{\text{toplam}} = \eta_{\text{dizel motor}} \times \eta_{\text{hidrolik}}$$

$$\eta_{\text{dizel motor}} = 0,35 - 0,40$$

$$\eta_{\text{hidrolik}} = 0,30 -$$

$$0,40$$

$$\eta_{\text{toplam}} = 0,35 * 0,40 = 0,14$$

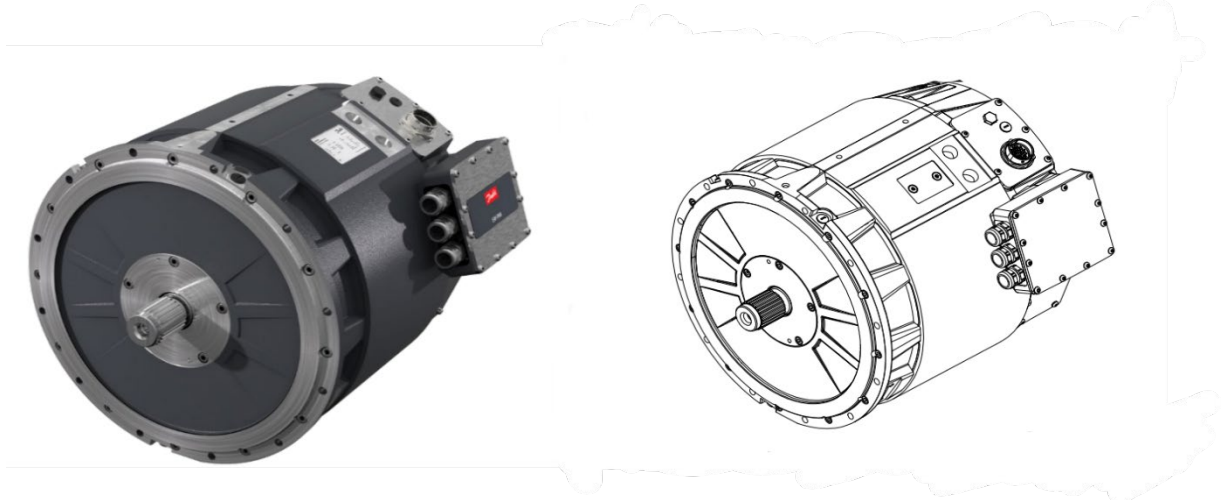
Elektrikli tahrik sistemleri, içten yanmalı motorlara kıyasla daha yüksek verim ve sıfır lokal egzoz emisyonu avantajı sunmaktadır. Bu sistemler, özellikle taşıt hareketinde yaygınlaşmış olsa da, hidrolik doğrusal hareketlerin sağlandığı uygulamalarda hala elektrikli çözümler yerine hidrolik silindirler tercih edilmektedir. Bunun başlıca nedenleri; maliyet, güç yoğunluğu ve sistem güvenilirliği gibi kriterlerdir.

Bu çalışmada, elektrik motoru ile çalışan ve hidrolik aktüasyon özelliğini koruyan yüksek verimli bir elektro-hidrolik sistemin performansı araştırılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak sistem bileşenlerinin kayıp modelleri oluşturulmuş ve bu modeller, tipik bir ekskavatör görev döngüsüne uygulanan simülasyonlarla analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, enerji ihtiyacında %24,8'e varan bir azalma sağlanabileceğini göstermekte; bu da batarya kapasitesinin ve toplam işletme maliyetlerinin önemli ölçüde azaltılabileceğine işaret etmektedir [2].

2. VERİMLİLİK AVANTAJI OLUŞTURAN ANA KOMPONENTLER

Geleneksel mobil hidrolik bir sistemi incelediğimizde verimliliğin en düşük olduğu kısımlardan biri tahrik kısmı olan dizel motordur. Bir diğer kısım olan hidrolik besleme kısmında ön plana çıkan pompa verimlilikleri diyebiliriz. Bu çalışmamızda her iki grubu inceleyerek geleneksel yöntemler ile verim kıyaslamalarını yapacağız ve elektrifikasyon kullanımı ile toplamdaki verim kazancını inceleyeceğiz.

Elektrik makinesi veya elektrik motoru, sabit mıknatıslı senkron relüktans destekli bir elektrik makinesidir. Bu makine hem motor hem de jeneratör olarak çalışabilir. Özellikle ağır hizmet tipi mobil makinelerde (örneğin iş makineleri) kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Söz konusu motor, sabit mıknatıslı senkron relüktans motorları (SRPM) teknolojisi ile hem yüksek tork yoğunluğu hem de yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır. Tipik uygulama alanları arasında elektrikli veya hibrit mobil iş makineleri yer almakta olup, kompakt yapısı, düşük kayıpları ve su bazlı etkin soğutma sistemi ile sistemin genel verimliliğine katkı sağlamaktadır [3].



Şekil 1. Elektrik Makinesi yapısı görüntüsü [3].

Sistem, doğru akım (DC) elektrik enerjisini sırasıyla mekanik dönel enerjiye ve ardından hidrolik güce dönüştürme yeteneğine sahiptir. Elektrik motoru, inverter ile sürülmekte olup; rotor çıkışındaki tork doğrudan Dijital Deplasmanlı pompayı tahrik etmektedir. Bu yapı sayesinde sistem; kompaktlık, yüksek tork yoğunluğu, sessiz çalışma ve yüksek enerji verimliliği gibi

avantajlar sunmaktadır. Ağır hizmet tipi mobil makineler için tasarlanmış, yüksek verimli ve modüler bir elektrikli tahrik sistemidir. Sistem, sabit mıknatıslı senkron relüktans motorları (SRPM), yüksek voltajlı inverterler, kontrol üniteleri ve güç elektroniği çözümlerinden oluşur.

Elektrik makinesi, özellikle elektrikli ve hibrit araç uygulamalarında, yüksek tork gereksinimlerini karşılamak ve enerji dönüşümünde düşük kayıplar elde etmek üzere optimize edilmiştir. Sistem; kompakt yapısı, IP65/IP67 koruma sınıfı, sıvı soğutmalı motor tasarımı ve gelişmiş kontrol algoritmaları sayesinde zorlu çalışma koşullarına sahip inşaat, madencilik ve tarım makinelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

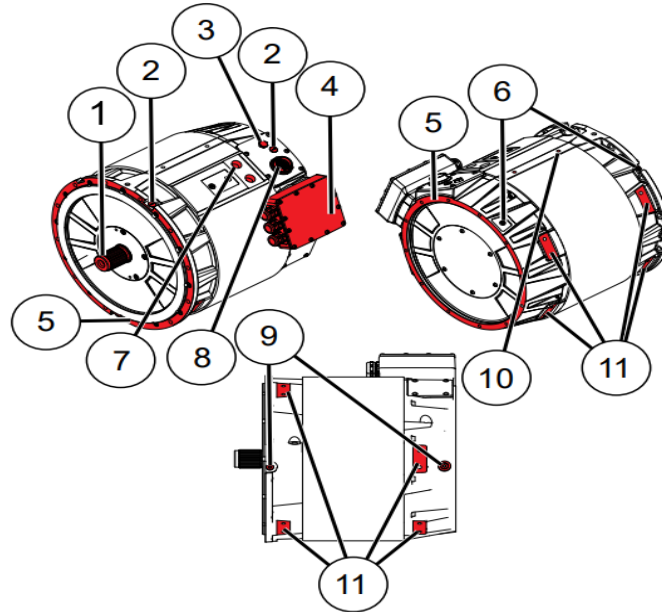
Bu bileşenler, modüler yapısı sayesinde farklı konfigürasyonlarda kolayca uyarlanabilir olup, DC veya AC kaynaklardan beslenebilen, ölçeklenebilir bir elektrikli güç aktarma sistemi sunar. Yüksek verimlilik değerleri (%95–%97 aralığında) ile çalışan bu sistemleri, aynı zamanda batarya kapasitesini azaltarak daha kompakt ve sürdürülebilir mobil sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

İleri düzey motor kontrol teknolojileriyle donatılmış bu sistemler, karbon salımını azaltmaya yönelik global dönüşümün önemli bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Gerçek zamanlı kontrol sistemleri sayesinde, motor torku, inverter çıkışı ve enerji tüketimi hassas şekilde yönetilebilmektedir [2].

Öne Çıkan Teknik Avantajlar;

- Yüksek verim (%96'ya kadar): Enerji dönüşümünde düşük kayıplar
- Kompakt yapı: Yoğun alan kullanımı olan mobil makineler için ideal
- Geniş devir aralığı: Düşük hızlarda yüksek tork sağlayabilir
- Düşük bakım ihtiyacı: Rotor fırçasız ve mıknatıslı yapı sayesinde

Motor tasarımını ve bileşenlerini aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz;



No	Bileşen / Bağlantı
1	Mil bağlantısı
2	Rulman sıcaklık sensörleri
3	Hava tahliye tapası
4	Güç bağlantılarını içeren bağlantı kutusu
5	Flanş montajları, D-ucu ve N-ucu
6	Gres dolum bağlantıları
7	Soğutma sistemi bağlantıları
8	Düşük voltaj konnektörü (ölçüm bağlantısı)
9	Gres tahliye bağlantısı, D-ucu ve N-ucu
10	Kaldırma noktaları
11	Ek bağlantı noktaları

Şekil 2. Elektrik Makinesi görüntüsü ve Bileşenleri [7].

Enerji Verimliliği ve Emisyon Etkisi;

Motor ve inverter kombinasyonları, yapılan saha ve laboratuvar testlerine göre; DC elektrikten mekanik enerjiye dönüşümde %95–%97 verimlilik, entegre sistemde (pompa dahil) %89'a kadar toplam sistem verimi, tipik bir iş döngüsünde (örneğin 16 tonluk ekskavatörle 8 saatlik çalışma) batarya ihtiyacında %24,8'e varan azalma sağlamaktadır [4].

Bu sayede sistem sadece enerji tüketimini değil, aynı zamanda:

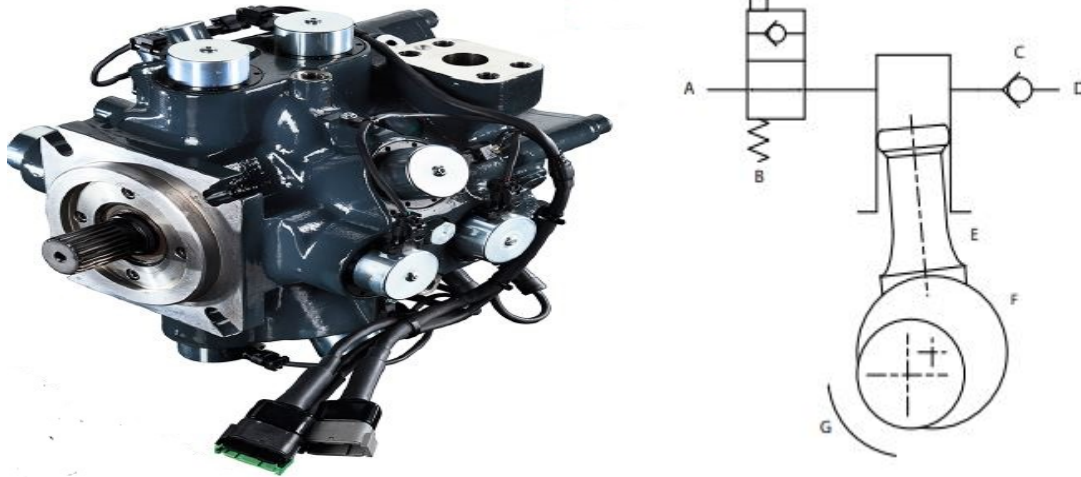
- CO₂ emisyonlarını %30'a kadar,
- Batarya boyutunu ve ağırlığını,
- Yakıt maliyetlerini de azaltmaktadır.

Ayrıca, rejeneratif enerji geri kazanımı sayesinde, yavaşlama ve duruş anlarında ortaya çıkan enerjinin tekrar sisteme kazandırılması da mümkündür.

2.2. Dijital Deplasmanlı Pompaların Sisteme Sunduğu Avantajlar

Dijital Deplasmanlı Pompalar, her bir pistonun bireysel olarak on/off kontrolü ile çalışmasını sağlayan elektrohidrolik bir sistemdir. Temel prensip; krank miline bağlı eksantrik kam tarafından çalıştırılan pistonların kontrollü olarak sıvı alıp boşaltmasıdır. Her pistonun giriş ve çıkışında bulunan çek valfler ve elektromanyetik valfler, sistemin anlık olarak hangi pistonun aktif olacağına karar verir.

Radyal pistonlu pompa tasarımına dayalı bir hidrolik pompa teknolojisidir. Bir elektronik kontrolör, karşılık gelen bir açma/kapama valfini harekete geçirerek her bir pistonu seçici olarak etkinleştirir. Bu şekilde, pompanın yer değiştirmesi dijital olarak değişkendir. Bu durum da hızlı ve doğru akış kontrolü sağlar. Dijital Deplasmanlı Pompalar, talebi karşılamak adına yalnızca gerektiği kadar piston kullandıkları için yüksek verimliliğe ve çok düşük rölanti kayıplarına sahiptir [9].



Şekil 3. DDP Pompa ve Piston yapısı görüntüsü [9].

Dijital Deplasmanlı pompa yapısı oldukça karmaşık bir ekipman olsa da çalışma mantığı basittir. Pompa yapısı, bir kam halkası etrafında radyal olarak düzenlenmiş bir dizi sabit, pozitif deplasmanlı, ileri geri hareket eden pistonlardan oluşmaktadır. Pistonlar ayrı ayrı açılıp kapatılabilir. Her piston solenoid bobinli bir popet valf, bir çek valf ve bir piston konum sensöründen oluşan kendi kontrol sistemine sahiptir. Bu kontroller, pompanın talebin gerektirdiği gibi 30 ms gibi kısa bir sürede cevap vermesini veya devre dışı bırakılmasına izin verir ve böylece güç akışına giren sıvı miktarını sınırlayabilir. Aslında, her bir adımın çıkış akışını değiştirebilen çok adımlı bir aktarımdır. Pistonların sayısı, yönü ve boyutu büyük ölçüde değişebilir. Yaygın olarak dörtlü üç grup halinde düzenlenmiş 12 pistonlu yapı kullanılır. [5]

2.2.1. Çalışma Prensibi

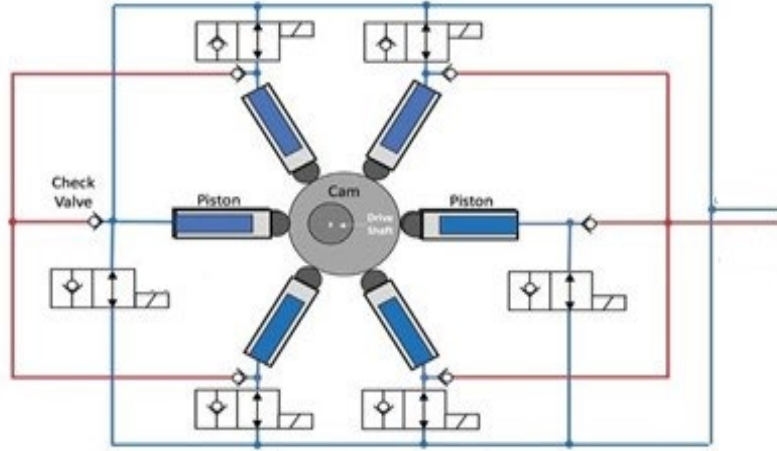
Aşağıda altı pistonlu bir pompayı gösteren devre şemasında çalışma koşulunu basitleştirilmiş olarak açıklayabiliriz. Kam döndükçe, pistonlar dönüşümlü olarak içeri çekilir ve dışarı itilir. Bir çek valf, pompanın yüksek ve alçak basınç alanlarını ayırır ve bir popet valf ile alçak basınç alanından gelen yolu açar ve kapatır. Bu, her pistonun bir pompa gibi ayrı ayrı kontrol edilmesine olanak sağlar.

Dijital Deplasmanlı Pompalar, basınç kontrolü, yük algılama, akış kontrolü, tork veya güç kontrolü ve bunların kombinasyonları dahil olmak üzere çeşitli kontrol modlarında çalışabilir. Kontrol modları, sensör girişlerine dayalı olarak kontrolcü tarafından izlenir ve bir yazılımla parametreler ve limitlerle yapılandırılır. Örneğin, basınç kontrol modunda pompa basıncını düzenlemek için, kontrolör ölçülen basıncı istenen basınçla karşılaştırır ve orantısal-entegre kontrol algoritması ile bir yer değiştirme komutunu hesaplar.

Örneğin değişken bir akış hızı elde etmenin temel olarak iki yolu vardır: kısmi piston vuruşları ve tam piston vuruşları.

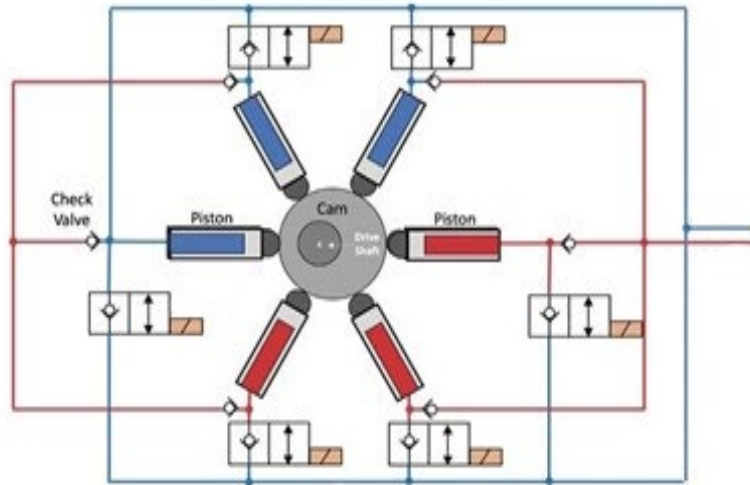
Açma-kapama kontrol valfi, pistonun yukarı stroğunun bir kısmı sırasında kapalı konumunda tutulur. Pistonun süpürülen hacminin ΔV sadece bir kısmı çıkış çek valfinden boşaltılır. Kısmi strok algoritması ile, komut verilen yer değiştirme x ile temsil edilir, burada $x = (V_c - V_t) / \Delta V$ ve 0 ile 1 arasında sürekli değişkendir. Çok pistonlu bir pompa için, basit bir kısmi strok algoritması komut verilen hacmin x kesri tüm pistonlar için aynıdır. Tam strok algoritması ile her bir pistonun süpürülen hacminin tamamı ya

girişe ya da çıkışa pompalanır. Akış hızı, mil döndükçe pistonların seçici olarak etkinleştirilmesi ve devre dışı bırakılmasıyla modüle edilir. Tam strok algoritması, yalnızca komut verilen hacimsel yer değiştirmeyi karşılamak için gereken minimum sayıda pistonu (N) basınç uygular [12].



Şekil 4. Pompa devre şeması [12].

Örneğin: 6 pistonun her biri 10 cc'lik bir yer değiştirmeye sahipse, toplam yer değiştirme 60 cc'lik olacaktır. 1800 rpm'de debi 108 lt/dk olacaktır. Her piston popet valfine enerji verildiğinde debi 18 lt/dk artar. Bir çalışma döngüsünün bir parçası 54 lt/dk gerektiriyorsa, gerekli çıktıyı üretmek için popet valflerden 3'üne stratejik olarak enerji verilebilir [12].



Şekil 5. Pompa devre şeması [12].

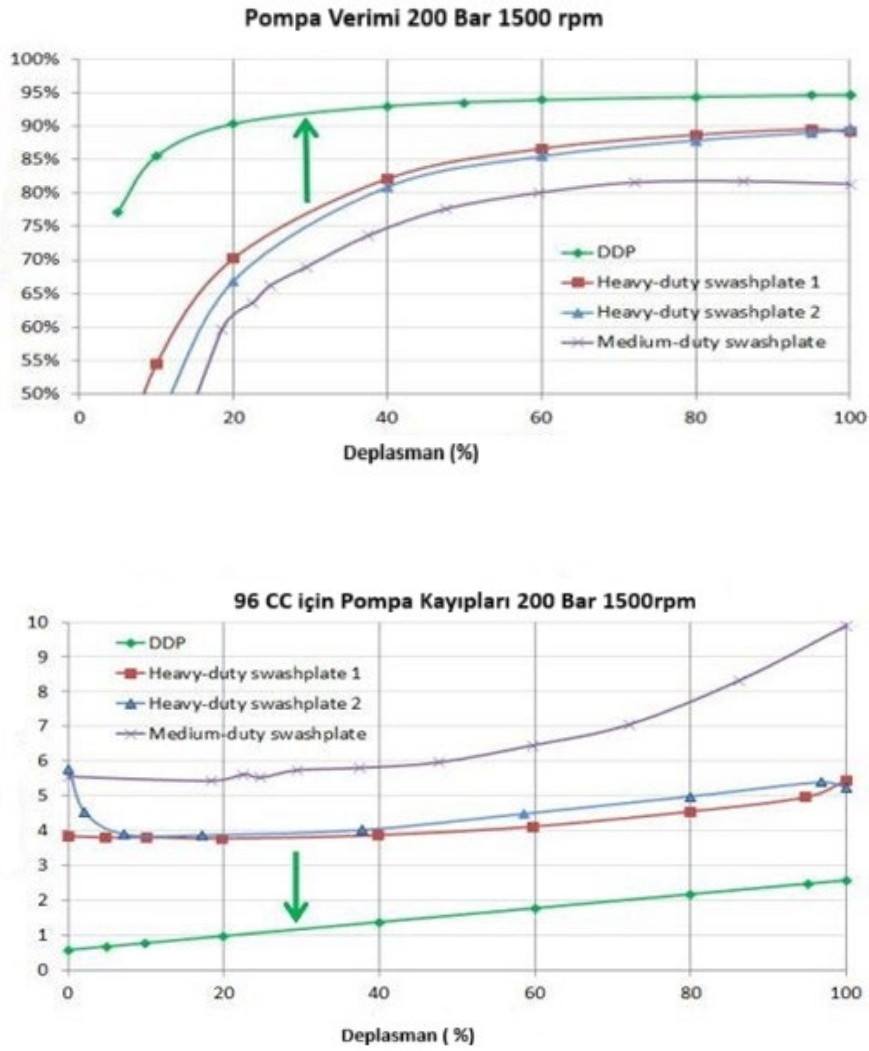
Diğer bir özellik ise, her bir pistonun çıkışını, bağımsız bir pompa gibi kullanılabilmesidir. Örneğimizdeki, her biri 18 lt/dk 'ya kadar değişen akışa sahip tek bir Dijital deplasmanlı pompadan 6 ayrı çıkış alınarak 6 ayrı hat beslenebilir.

Öne Çıkan Teknik Avantajlar;

- Her pistonun bağımsız kontrolü, gerektiğinde pompa kapasitesinin 0'a kadar düşürülmesini sağlar.

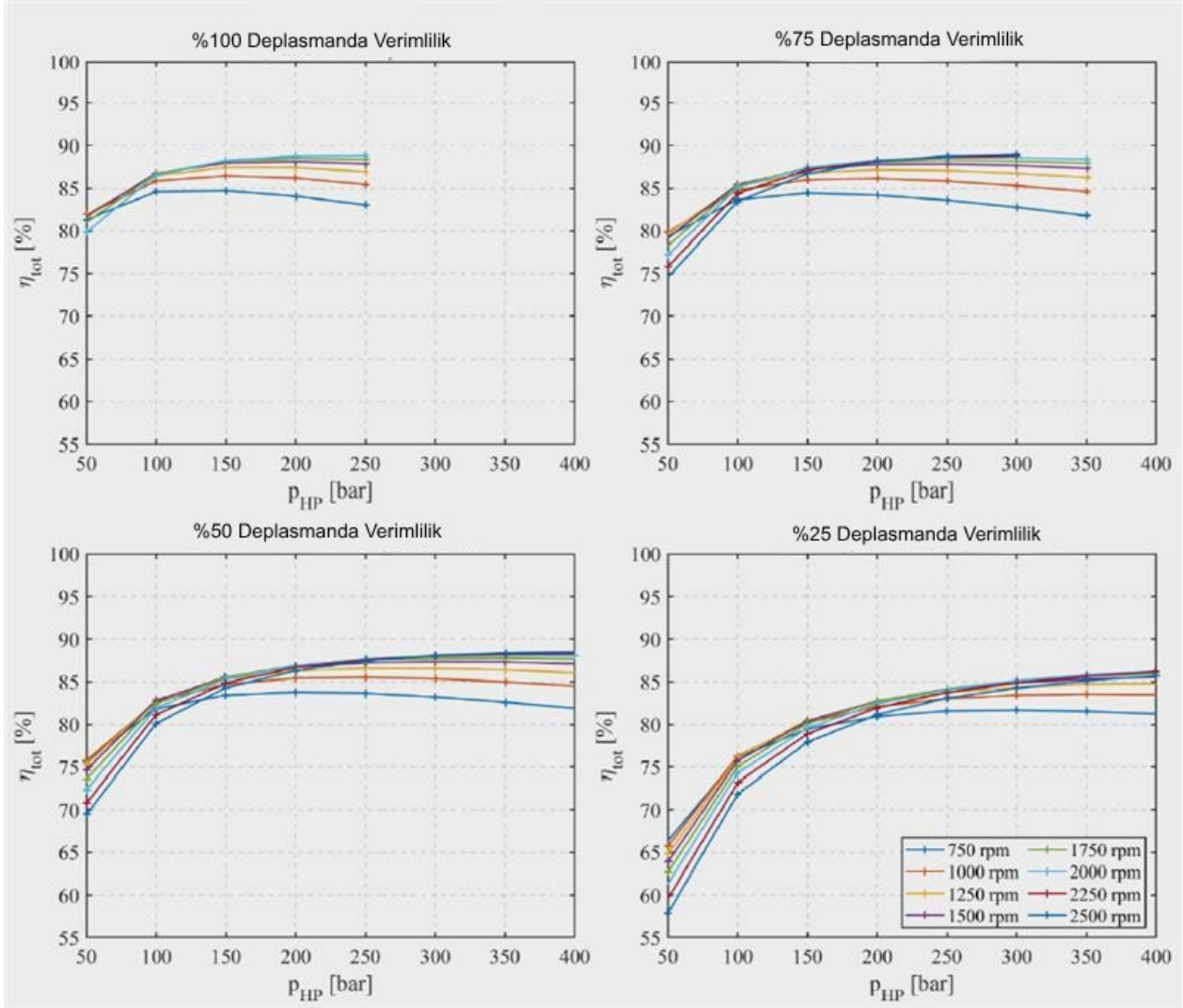
- Yüksek dinamik performansı 5–10 ms tepki süresi ile ani yük değişimlerine karşılık verebilir.
- Enerji geri kazanımı özelliği sayesinde bazı görev döngülerinde pistonların geri dönüş enerjisi, şaft torkunu desteklemek için kullanılabilir.
- Elektronik kontrol sayesinde sıcaklık, akış ve basınç gibi parametreler gerçek zamanlı izlenebilir.
- Pompa, CAN-bus gibi endüstriyel iletişim protokolleri ile araç kontrol ünitesine entegre çalışabilir.

Dijital deplasmanlı pompaları geleneksel hidrolik pompalar ile karşılaştırdığımızda, potansiyel faydayı daha açık görebiliriz. Şekil 6 de belirtilen grafiklerden pompa deplasmanlarına göre genel verimlilik ve kaybedilen güçleri kıyasladığımızda geleneksel değişken deplasmanlı pistonlu pompalar ile dijital deplasmanlı pompalar arasındaki verimlilik kazanımlarını / kayıplarını açıkça göstermektedir. En önemli gelişme kısmi yer değiştirmede ortaya çıkar; birçok mobil makinenin önemli miktarda çalışma süresi harcadığı kısımdır [7].



Şekil 7. Pompa verim/kayıp eğrileri [12].

Test verileri, DDP teknolojisinin özellikle düşük deplasman oranlarında dahi yüksek verimlilik sağladığını göstermektedir. Örneğin %25 deplasman oranında sistem verimi %86,2'ye ulaşabilmektedir. Tam yük altında ise toplam pompa verimliliği %89 olarak ölçülmüştür. Geleneksel pompaların bu koşullarda %70–75 aralığında kaldığı göz önüne alındığında, DDP teknolojisinin %20'ye varan enerji tasarrufu sağladığı söylenebilir. Bunun yanında, pompa iç kayıpları azaltıldığından, ısı kayıpları da minimum düzeye iner ve soğutma sistem ihtiyacı azalır.



Şekil 8. Pompa Deplasmana bağlı verim değerleri [2].

3. UYGULAMA DEĞERLENDİRMESİ

DDP teknolojisini ve elektrik motorunu birleştirerek yüksek verimli bir elektro-hidrolik sistemin performansı elde edilmesi hedeflenmektedir. Amaç, özellikle off-highway (karayolu dışı) iş makinelerinde, verimliliği artırmak ve enerji tüketimini azaltmaktır. Yapılan çalışmalar bu teknolojilerin birlikte kullanılmasıyla batarya enerji ihtiyacında %24,8'e kadar düşüş sağlanabileceğini göstermektedir.

Sistem bileşenlerini özetlemek gerekirse elektrik motorunu sürmek için bir inverter, yüksek tork ve verimli çalışma sonuçlarını elde edebilecek bir senkron relüktans destekli sabit mıknatıslı elektrik motoru, Dijital olarak kontrol edilen, değişken deplasmanlı, düşük kayıplı hidrolik pompa, pompanın

azaltımı sağlanması, bu makinelerin beklenen ömürleri boyunca toplamda 80 milyon ton CO₂ emisyonunun önlenmesi anlamına gelmektedir.

Yapılan analizler ve çalışmalara göre, 2030 yılına kadar tüm sektör genelinde %30'luk bir CO₂ azaltımı sağlanabilmesi için: 10–35 tonluk ekskavatör sınıfında, %40 oranında batarya elektrikli araç kullanımı ve %48 oranında Dijital Deplasman teknolojisinin benimsenmesi gerekmektedir. Eğer bu benimseme oranlarına ulaşılamazsa bile %30 batarya elektrikli araç kullanımı ve %40 Dijital Deplasman uygulaması ile %24 oranında CO₂ azaltımı yine de mümkün olacaktır. Buna ek olarak, iyileştirilmiş kontrol sistemleri ve operatör eğitimi sayesinde geliştirilecek daha verimli kullanıcı davranışları, bu farkı kapatabileceği ön görülmektedir.

Ek olarak, sistem verimliliğini daha da artırmak ve batarya kapasitesini azaltmak amacıyla, enerji geri kazanımına olanak sağlayan Dijital Deplasman pompa/motor kombinasyonu değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>
- [2] Jérémie Lagarde, Matthew Green, Alexis Dole, Joonas Talvitie and Juha Toikka Danfoss Digital Displacement & Editron: An efficient electro-hydraulic system for mobile applications, The 13th International Fluid Power Conference, 13. IFK, March 21-23, 2022, Aachen, Germany
- [3] <https://assets.danfoss.com/documents/515785/AI506733497379en-000104.pdf>
- [4] Dr. Niall Caldwell – Digitalization, Electrification & Efficiency – a shorter route to zero for excavators, IVT Expo – June 2023.
- [5] Artemis Intelligent Power Ltd, Unit 3, Edgefield Industrial Estate, Loanhead, EH20 9TB, UK www.artemisip.com j.taylor@artemisip.com Presented at the JSAE Annual Congress on 24 May 2011.
- [6] Technical Comparison of Next-Generation Hydraulic and Electric Powertrain Architectures Simon Nielsen, Sr. Systems Engineer, Global Research & Development
- [7] <https://www.ccefp.org/wp-content/uploads/2015/12/Digital-displacement-technology-Danfoss.pdf>
- [8] <https://fluidpowerjournal.com/digital-displacement-pumps>
- [9] <https://assets.danfoss.com/documents/354712/BC306384089197en-000202.pdf>
- [10] MS Nadorias: upgrade to high-efficiency hybrid propulsion delivers fuel savings.
- [11] <https://assets.danfoss.com/documents/latest/220886/BE436367355417en-000201.pdf>
- [12] UĞURLU E. Hidrolik Sistemlerde Enerji Verimliliği, 9. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi 2022.

ÖZGEÇMİŞ

Eren UĞURLU

1992 yılı İstanbul doğumludur. İlk ve Orta Öğretimini İstanbul'da tamamlamıştır. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. 2017 yılından beri Mert Teknik firmasında Proje ve Satış Mühendisi olarak çalışmaktadır.