



ENERJİ KAZANIMLI HİDROSTATİK İLETİM SİSTEMİNDE PERFORMANS VE YAKIT TÜKETİMİNİN MODEL TABANLI SİSTEM SİMÜLASYONU YAKLAŞIMI İLE İNCELENMESİ

*INVESTIGATION OF PERFORMANCE AND FUEL CONSUMPTION IN ENERGY RECOVERY HYDROSTATIC
TRANSMISSION SYSTEM WITH MODEL-BASED SYSTEM SIMULATION APPROACH*

Mustafa Yosun
İzzet Özcan

ÖZET

Hidrostatik iletim sistemleri, genellikle iş makinelerinde, ağır taşıtlarda, içten yanmalı motorun gücünü kontrollü bir şekilde aktarmak için kullanılır. Kullanılan teknoloji, iletim sistemlerinin performansını ve enerji tasarrufunu doğrudan etkilemektedir. Sistemlerin gerçek çalışma şartlarındaki davranışına göre sistem mimarisini tasarlamak ve boyutlandırmak gerekir. Hidrostatik iletim teknolojisinin kullanıldığı bir alan olan forkliftlerin yakıt tüketimini ölçmek için standart olarak VDI çevrimi kullanılabilir. Bu çalışmada, model tabanlı sistem simülasyonu yaklaşımı ile bir hidrostatik iletim sisteminin geleneksel ve enerji kazanımlı mimarilerinin fonksiyonel modeli oluşturulmuş, standart bir çevrim süresince sistemin çalışma performansı analiz edilmiştir. Yapılan uygulamada hidrostatik iletim sistemindeki hidrolik akümülatörler ve oransal valflerinin denetimi sayesinde enerji kazanımı sağlanmıştır. Bu sayede geleneksel ve enerji kazanımlı iletim sisteminin davranışı analiz edilip, performans ve yakıt tüketimi üzerine etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Model tabanlı sistem simülasyonu, Hidrostatik iletim, enerji kazanımı, rejeneratif

ABSTRACT

Hydrostatic transmission systems are usually used to transfer the power of internal combustion engine in a controlled manner in construction machines, heavy duty vehicles. The technology used directly affects the performance and energy savings of the transmission systems. It is necessary to design and size the system architecture according to the behavior of the systems in real operating conditions. The VDI cycle can be used as standard to measure the fuel consumption of forklifts where hydrostatic transmission technology is used. In this study, a functional model of conventional and energy efficient architectures of a hydrostatic transmission system has been created with a model-based system simulation approach, and operating performance of the system during a standard cycle has been analyzed. In this application, energy was gained by the control of hydraulic accumulators and proportional valves in the hydrostatic transmission system. By this way, the behavior of conventional and energy efficient transmission system has been analyzed and its effect on performance and fuel consumption have been investigated.

Key words: Model based system simulation, hydrostatic transmission, energy efficient, regenerative

1. GİRİŞ

Hidrostatik iletim sistemleri traktör, vinç yürütme sistemleri gibi ağır vasıtalarda ve forklift, ekskavatör, yük kaldırma... vb. gibi iş makinelerinde güç iletimini sağlamak için kullanılmaktadır. İş makinelerinin çalışma ömrü boyunca harcadığı yakıt neredeyse en büyük mali gideri oluşturur. Yakıt tüketimini iyileştirmek araçların çalışma maliyetlerini de düşürecektir. İçten yanmalı motorun, iletim elemanlarının

iyileştirilmesi ve hibrit sistemler ile yakıt tüketimi iyileştirilebilir. Hidrolik sistemlerin kullanıldığı güç iletim teknolojileri otomotiv sektöründe kullanımı artan elektrikli sistemler ile kıyaslandığında yüksek güç yoğunluğu, güvenilirlik ve maliyet açısından daha avantajlı bir seçimdir. Hidrolik hibrit teknolojisi ile araçların frenleme ve ivmelenmesi esnasında elektrikli araçların %55'ine kıyasla %70-80 enerjisi depolanıp yeniden kullanılabilir [1,2]. Forklift tahrik sistemleri genellikle hidrostatik iletim sistemine sahiptir. Frenleme esnasında forkliftin kinetik enerjisi hidrolik sıvıya termal enerji olarak aktarılır. Hibrit hidrolik sürüş sayesinde yakıt tüketimi %25'e kadar azaltılabilirken beraberinde CO2 emisyonunda da düşüş sağlanacaktır.

Bu çalışmada enerji verimli bir sistemin nümerik modeli Simcenter Amesim yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Gerçekçi boyutlara sahip bir forkliftin yakıt tüketimi VDI-2198 çalışma çevrimine analiz edilmiştir. Seri hibrit hidrolik teknolojisi ile pompa/motor ve akümülatörler arasındaki akışı yönlendiren valflerin kontrolü sayesinde enerji verimli çalışan bir sistem elde edilmiştir. Enerji verimli hidrostatik iletim sisteminin geleneksel sisteme göre performansı ve yakıt tasarrufu incelenmiştir.

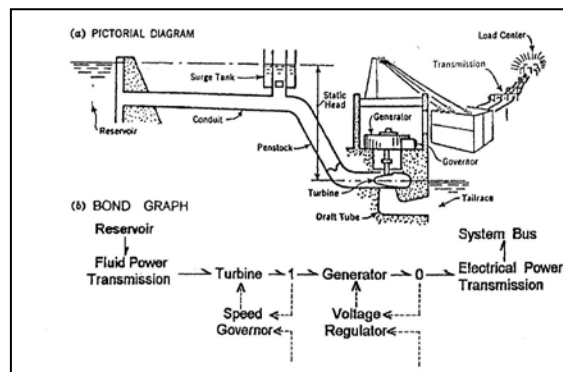
2. BİR BOYUTLU SİSTEM MODELLEME

Sistem, belirli bir amacı yerine getirmek üzere farklı fiziksel elemanların etkileşimli olarak bir arada yer aldığı işlevsel bir bütündür. Sistem benzetimi ise gerçek hayattaki fiziksel süreçlerin zamana bağlı taklit edilmesidir. Sistem benzetimi günümüzde dijital ikiz modellerin oluşturulmasında önemli bir yere sahiptir. Dijital ikiz, fiziksel bir ürünün ya da bir hizmetin gerçek dünyadaki davranışının ve oluşturduğu sonuçların sanal modeli olarak tanımlanır. Bu modeller üzerinden yapılan çalışmalar sayesinde fiziksel değişiklikler ve testler için harcanan süreleri büyük oranda azaltmak mümkündür.

Herhangi bir fiziksel durum, konuma ve zamana bağlı kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilebilir. Ancak bu denklemlerin uzay ve zaman alanında çözümünü zor ve zaman alıcı olabilmektedir. Buna karşın fiziksel sistemler sadece zamana bağlı eşitlikler (ODE, DAE) ile ifade edilebilir. Sistemin davranışı sadece zaman değişkenine bağlı çözüldüğünden bir boyutlu simülasyon olarak isimlendirilir. Bu eşitlikleri çözmek için gereken hesaplama yükü üç boyutlu analizlere göre daha azdır. Ayrıca birbiri ile ilişkili çok sayıda fiziksel olayı birlikte analiz etmek bir boyutlu sistem benzetimi ile daha kolaydır. Farklı fiziksel sistemlerin birbiri ile etkileşimli modellenmesi ve kontrol teknolojileri ile bileşimi, gerçek çalışma şartlarındaki sistemlerin performansını tahmin edebilmeye imkan tanır.

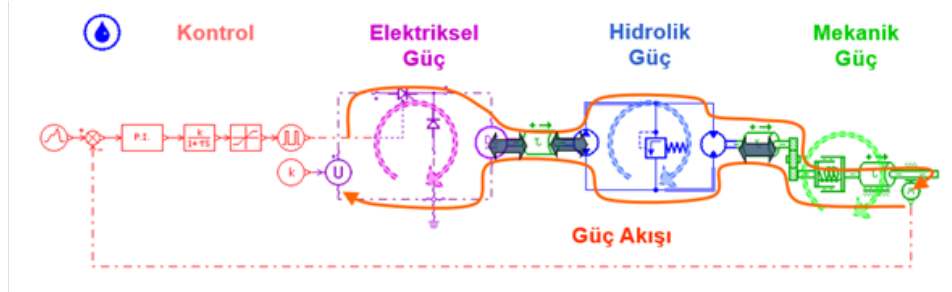
2.1. Modelleme Prensipleri

Mühendislik sistemlerinin benzetimi için grafik tabanlı yöntemler sıkça tercih edilmektedir. Grafik tabanlı yöntemlerden yaygın olarak bilinen lineer grafik, bağ grafiği (bond graph) ve blok diyagram yöntemleri kullanılır. Bağ grafiği yaklaşımı, çoklu fizik sistemlerin etkileşimlerini hesaplayabilmek için kullanılan grafik tabanlı bir yöntemdir. Oluşturulan grafik sayesinde elemanların fiziksel davranışları ve birbiri ile etkileşimini temsil eden modeller elde edilir. Bond graph tabanlı ilk örnek Prof. Henry PAYNTER tarafından bir hidroelektrik çevrim sisteminin benzetimi için geliştirilmiştir [3].



Şekil 1. İlk Bond Graph örneği (Hidroelektrik çevrimi) [3]

Çoklu fizik sistemini oluşturan alt sistemler arasında belirli prensiplere göre ortak bir güç dengesi ve transferi söz konusudur. Bu farklı fiziksel sistemler arasında enerji alışverişleri ile benzetim yapmak, modelleme yaklaşımının yanı sıra farklı fizikler için yapılan analizleri ortak bir dilde birleştirmeyi sağlar. Pratik bir metot olan bağ grafik yaklaşımı ile sistemin dinamik davranışı, çeşitli alt sistemler arasındaki enerji akışı, depolanması ve enerjinin dönüşümü ilkeleri ile tanımlanabilir.



Şekil 2. Çoklu fiziksel sistemde güç akışı (Amesim modeli)

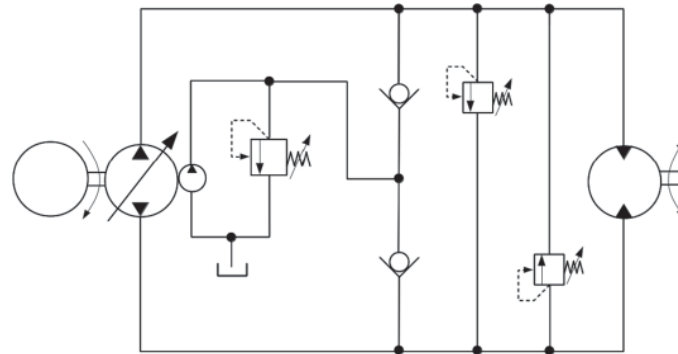
Bağ grafiği yöntemini kullanan Amesim yazılımı ile elektriksel, hidrolik ve mekanik gücün iletimi Şekil 2'de gösterildiği gibi modellenerek analiz edilebilir. Sanal prototipleme ve ürün geliştirme süreçlerinde sistem simülasyonu gelişen endüstrimizde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada mekanik, hidrolik ve kontrol elemanlarından oluşan bir hidrostatik iletim sistemi detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3. HİDROSTATİK İLETİM SİSTEMİ

Genel olarak hidrostatik iletim kavramı, güç kaynağından (içten yanmalı motor) hidrolik motora, hidrolik pompa sayesinde iki dönen şaft arasındaki iletimin temelde bu elemanların herhangi bir kombinasyonu ile sağlanması olarak ifade edilebilir [4]. İçten yanmalı motordan gelen gücün iletimi manuel ya da otomatik şanzımanlar ile doğrudan mekanik olarak sağlanabilir ancak hızın geçiş oranı ve iletim sisteminin verimliliği göz önüne alındığında hidrostatik iletim sistemleri daha avantajlıdır. Farklı pompa ve motor kombinasyonunda iletim oranı dört farklı şekilde sağlanabilir.

1. Sabit deplasmanlı pompa-sabit deplasmanlı motor
2. Değişken deplasmanlı pompa-sabit deplasmanlı motor
3. Sabit deplasmanlı pompa-değişken deplasmanlı motor
4. Değişken deplasmanlı pompa-değişken deplasmanlı motor

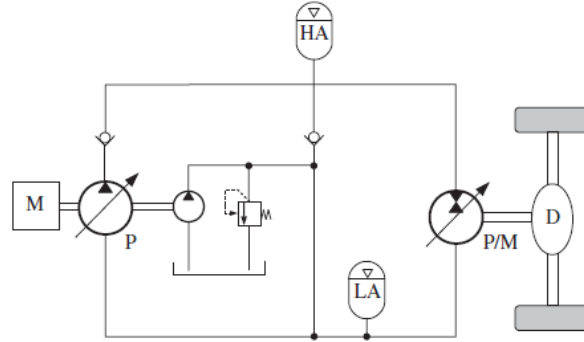
Bunların içerisinde değişken deplasmanlı pompa ve motor kullanmak en esnek olan seçenektir. Sonsuz değişken iletim oranı sayesinde en düşük yakıt tüketimi sağlanabilir. Hidrostatik iletim sisteminin devresi ISO 1219-1 standardında verilen hidrolik semboller oluşturulabilir. Güç kaynakları ve iş yapan sistemler ise standart olmayan semboller ile ifade edilebilir. Şekil 3'de şarj devreli bir hidrostatik iletim sisteminin şeması verilmiştir.



Şekil 3. Şarj devreli basit bir hidrostatik iletim sisteminin standart semboller ile gösterimi [4]

3.1 Enerji Kazanımlı Mimari

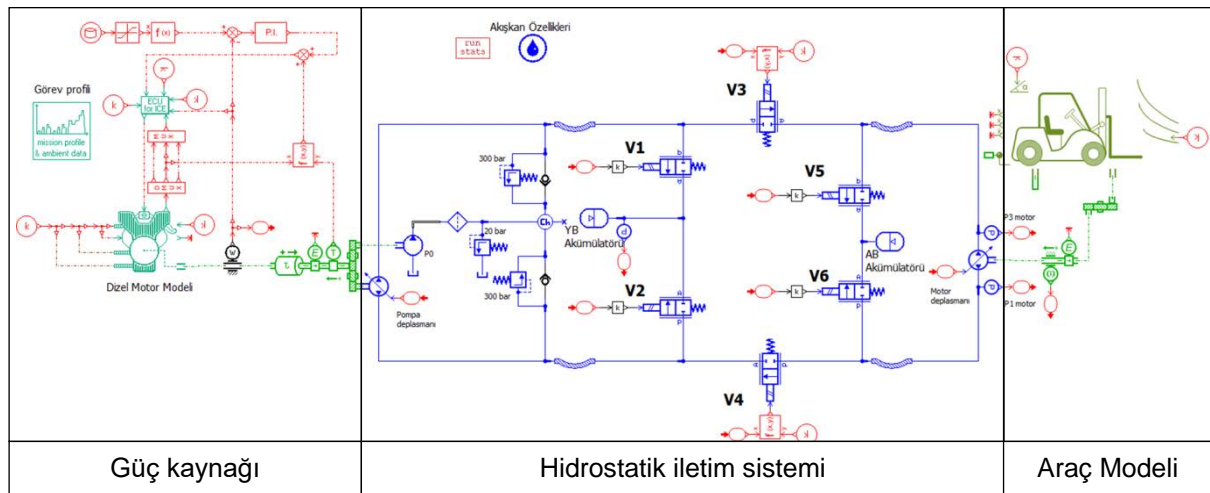
Hibrit hidrolik sistemlerde enerji kazanım sistemlerinin temel fikri frenleme sırasındaki kinetik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştürülüp depolanmasıdır. Hibrit hidrolik modeller genellikle seri ya da paralel olarak tasarlanır. Enerji alçak basınç (AB) akümülatöründen yüksek basınç (YB) akümülatörüne hidrolik akışkan pompalanarak depolanır. Rejenerasyon modunda ise akümülatörler arasındaki basınç farkı kinetik enerjiye dönüştürülerek iş yapılır. Şekil 4'de basit bir seri hibrit hidrostatik iletim devresi gösterilmiştir. Böyle basit bir devrede çek valfler, pompa ve motorların değişken deplasmanları sayesinde enerji depolanıp ivmelenme anında kullanılabilir. İvmelenme esnasında depolanan enerji çekiş hattını besleyerek içten yanmalı motorun yükünü azaltılarak yakıt tasarrufu sağlanabilir.



Şekil 4. Basit bir seri hibrit hidrostatik iletim devresi [4]

4. FORKLİFT TAM SİSTEM MODELİ

Forkliftin tam sistem modeli Simcenter Amesim yazılımında ilgili fiziksel kütüphaneler kullanılarak Şekil 5'de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Güç kaynağı olarak IFP (Institut Français du Pétrole) Drive kütüphanesinde yer alan içten yanmalı motor modeli ile 4 silindirli 2.0 L dizel motor oluşturulmuştur. Aracın belirli çevre şartlarında istenen VDI çevrimini yapmasına imkân sağlayan görev profili oluşturulmuştur. Yük ile birlikte toplam forklift ağırlığı 4000 kg alınmıştır. Hidrostatik iletim sisteminden gelen devir 1/10 dişli oranı ile forkliftin tek aksına aktarılmıştır. Eğim ya da aerodinamik kayıplar dikkate alınmayıp sadece yuvarlanma direnci (0.02 oranı) ve viskoz sürtünme (0.1N/(m/s)) hesaba katılmıştır. Hidrostatik iletim sistemi ise şarj devresi, boru uzunlukları, YB-AB akümülatörleri ve akış yönünü kontrol eden valfler ile oluşturulmuştur. Valf komutları YB akümülatöründeki basınç ve aracın hızı dikkate alınarak oluşturulmuştur.



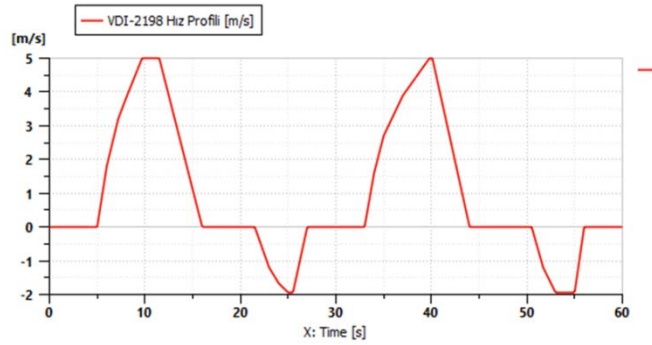
Şekil 5. Forklift güç iletiminin tam sistem modeli

Valf komutları ile sistemin çalışma mantığı bir sonraki başlık altında detaylı olarak ele alınmıştır. Sistemde kullanılan alt elemanlar ve boyutları:

1. 2 adet 4 kadranlı değişken deplasmanlı pompa/motor
2. Hidrolik pompa maksimum deplasman : 28 cc/dev
3. Hidrolik motor maksimum deplasman : 55 cc/dev
4. İki pompa/motor için de volümetrik verim 0.92, hidromekanik verim 0.96
5. 2 L hacimli 4 silindri motor için performans, yakıt tüketimi ve emisyon tabloları IFP modeli ile oluşturuldu
6. 6 adet akış kontrol valfi
7. 6L YB (ön yükleme basıncı: 40 bar) ve AB (ön yükleme basıncı: 4.3 bar) akümülatörü
8. Aks dişli oranı = 10
9. Valf ve Pompa/motor deplasman kontrolü

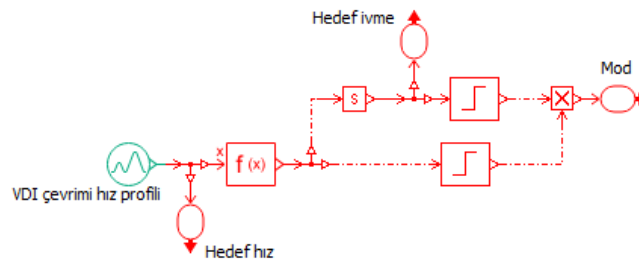
4.1. Valf ve Pompa/Motor deplasman kontrolü

Bu çalışmada enerji geri kazanımı çalışma şartlarına göre sistemdeki uygun akış yönünü valfler sayesinde belirlenmiştir. Gerçekçi bir çalışma şartı olarak Şekil 6'da verilen VDI-2198 standart hız profili kullanılmıştır.



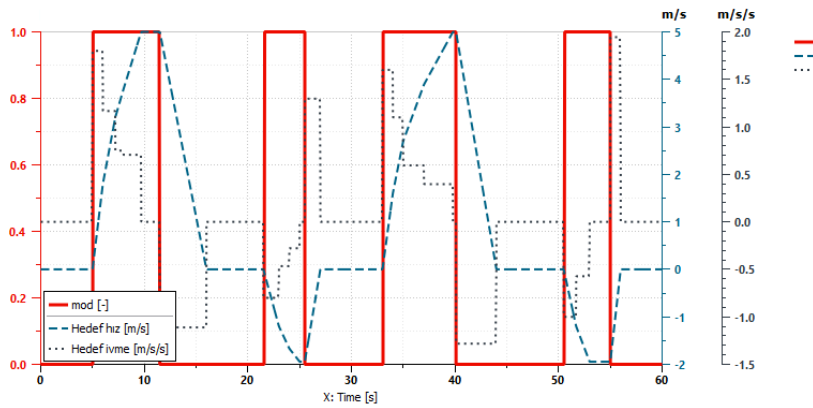
Şekil 6. Forkliftler için kullanılan standart VDI-2198 hız profili

Şekil 7'deki sinyal işlemi sayesinde VDI çevrimine göre forkliftler için standart olan hız komutu ile ivme hesaplanıp ardından 0-1 eşiği kullanılarak forkliftin hem hızlandığı hem de ivmelendiği koşullarda 1, diğer koşullarda 0 mod değeri elde edilmiştir.



Şekil 7. Hız ve ivmeye göre çalışma modunun hesaplanması

Şekil 8'de hız, ivme ve bu değişkenlere göre elde edilen mod değerleri görülmektedir. Bu mod değerleri ile uygun çalışma çevrimlerini sağlayabilmek için valf kontrolleri gerçekleştirilecektir.



Şekil 8. Hız ve ivme değişkenlerine göre elde edilen mod değerleri

Hidrostatik transmisyon sisteminden enerji kazanımı elde edilmesi için kullanılan hidrolik valflerin kontrol sistemi aşağıdaki Tablo 1'de gösterilmiştir. Çalışma süresi boyunca valflerin durumu zamana bağlı olarak mod değeri, hedef hız değeri, akümülatör basıncı ve hidrolik motorun hızına göre belirlenir. Verilen mantıksal ifadelerin doğru olması 1, yanlış olması 0 değerini verir, ilgili mod değeri (1 ya da 0) mantıksal tersi mod^{-1} (0 ya da 1) ile çarpılır ardından her iki mod durumu toplanarak valfin komutu belirlenir.

Tablo 1. Valf kontrol mantık tablosu

		Hedef Hız > 0	Hedef Hız < 0
V1	Mod	0	$P > 190$
	Mod^{-1}	0	$ \text{Motor Hızı} > 10$
V2	Mod	$P > 190$	0
	Mod^{-1}	$ \text{Motor Hızı} > 10$	0
V3	Mod	Tamamen Açık	$P < 190$
	Mod^{-1}	0	$ \text{Motor Hızı} > 10$
V4	Mod	$P < 190$	Tamamen Açık
	Mod^{-1}	$ \text{Motor Hızı} > 10$	
V5	Mod	0	$P > 190$
	Mod^{-1}	$ \text{Motor Hızı} > 10$	0
V6	Mod	$P > 190$	0
	Mod^{-1}	0	$ \text{Motor Hızı} > 10$

*Mod: Çalışma modu 1, Mod^{-1} : Mod değerlerinin tersi

* $P > 190$, $P < 190$: YB akümülatördeki basıncın 190 bar değerinin üzerinde ya da altında olması

* $|\text{Motor Hızı}| > 10$: Hidrolik motorun mutlak hız değerinin 10 dev/dak 'den büyük olması

$$V1 = (\text{Mod} * P > 190 + \text{Mod}^{-1} * \text{MotorHızı} > 10) * Vt < 0 \quad (1)$$

$$V2 = (\text{Mod} * P > 190 + \text{Mod}^{-1} * \text{MotorHızı} > 10) * Vt > 0 \quad (2)$$

$$V3 = (\text{Mod} * P < 190 + \text{Mod}^{-1} * \text{MotorHızı} > 10) * Vt < 0 + \text{Mode} * Vt > 0 \quad (3)$$

$$V4 = (\text{Mod} * P < 190 + \text{Mod}^{-1} * \text{MotorHızı} > 10) * Vt > 0 + \text{Mode} * Vt < 0 \quad (4)$$

$$V5 = \text{Mod} * P > 190 * Vt < 0 + \text{Mod}^{-1} * \text{MotorHızı} > 10 * Vt > 0 \quad (5)$$

$$V6 = \text{Mod} * P > 190 * Vt > 0 + \text{Mod}^{-1} * \text{MotorHızı} > 10 * Vt < 0 \quad (6)$$

Tablo 1'de yer alan Valf kontrol mantık tablosunun matematiksel karşılığı eşitlik 1-6'daki gibidir.

Tüm zaman alanı için yukarıdaki eşitler yardımıyla hangi valflerin açık ya da kapalı olacağı elde edilmektedir. Örneğin, simülasyonun 5. saniyesinde valflerin açık veya kapalı olma durumlarını inceleyelim.

- Bu sürede forklift hem ivmelendiği hem de hızlandığı için mod değeri 1, mod⁻¹ değeri 0'dır.
- Hedef hız değeri sıfırdan küçük olduğundan $V_t < 0$ için 1, $V_t > 0$ için 0'dır
- YB akümülatöründe basınç 190 bar'ın üzerinde olduğu için alacağı değer 1'dir.
- Motor hızının da mutlak değerinin 10 dev/dak'nın üzerinde olduğu için alacağı değer 1'dir.

Bu değerler eşitlik 1-6'da yerlerine konulduğunda,

$V_1=0, V_2=1, V_3=1, V_4=0, V_5=0, V_6=1$ sonuçları elde edilir. Böylece V_2, V_3 ve V_6 numaralı valflerin 5. saniyede açık olduklarını gözlemleyebiliriz.

2 adet 4 kadranlı hidrolik pompa/motor deplasmanlarının kontrolü ise Tablo 2'e göre mantıksal bir kontrol algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol algoritması Simcenter Amesim'de bulunan 'Statechart' aracı ile oluşturulmuştur. Simülasyon süresi boyunca sistemin çalışma modu, hedef hız ile maksimum hızın birbiri arasındaki büyüklük/küçüklük ilişkisi ve hedef hızın pozitif/negatif olması koşullarına göre sistemin hangi çalışma fazında olduğu ve elde edilen çalışma fazına göre motorun ve pompanın deplasmanları belirlenir.

Tablo 2. Pompa ve motor deplasman değerlerinin hesaplanması

DURUŞ		
$mod < 1$	$ \omega_{motor} \leq 10$	
$P = 0$	$M = -1$	

İLERİ YÖNDE YÜKSEK HIZ		
$mod > 0$	$V_{hedef} > V_{max}$	$V_{hedef} > 0$
$P = 1$	$M = -\frac{V_{max}}{V_{hedef}}$	

GERİ YÖNDE YÜKSEK HIZ		
$mod > 0$	$ V_{hedef} > V_{max}$	$V_{hedef} < 0$
$P = -1$	$M = -\frac{V_{max}}{V_{hedef}}$	

İLERİ YÖNDE DÜŞÜK HIZ		
$mod > 0$	$V_{hedef} < V_{max}$	$V_{hedef} > 0$
$P = \frac{V_{hedef}}{V_{max}}$	$M = -1$	

GERİ YÖNDE DÜŞÜK HIZ		
$mod > 0$	$ V_{hedef} < V_{max}$	$V_{hedef} < 0$
$P = -\frac{V_{hedef}}{V_{max}}$	$M = -1$	

İLERİ YÖNDE FRENLEME		
$mod < 1$	$\omega_{motor} > 10$	$V_{hedef} > 0$
$P = 0$	$M = \max(-1, \min(0, \frac{T_{hedef}}{T_{motor}}))$	

İLERİ YÖNDE FRENLEME		
$mod < 1$	$\omega_{motor} > 10$	$V_{hedef} < 0$
$P = 0$	$M = \max(-1, \min(0, -\frac{T_{hedef}}{T_{motor}}))$	

4.2. ÇALIŞMA FAZLARI

Akış kontrol valfleri sayesinde forkliftin çalışma çevrimi boyunca sistemin enerji kazancı ve bu enerjinin ihtiyaç anında kullanımı kontrol edilecektir. Bu sistemde hidroliğin akış yönünü belirleyen 6 adet 2 konumlu 2 yollu akış kontrol valfi kullanılmıştır. Aşağıdaki beş farklı çalışma fazı sayesinde sistemde frenleme esnasında enerji depolanıp ivmelenme esnasında kullanılmıştır.

- Akümülatörler ile İleri Yönlü Rejeneratif İletim
- Normal İletim

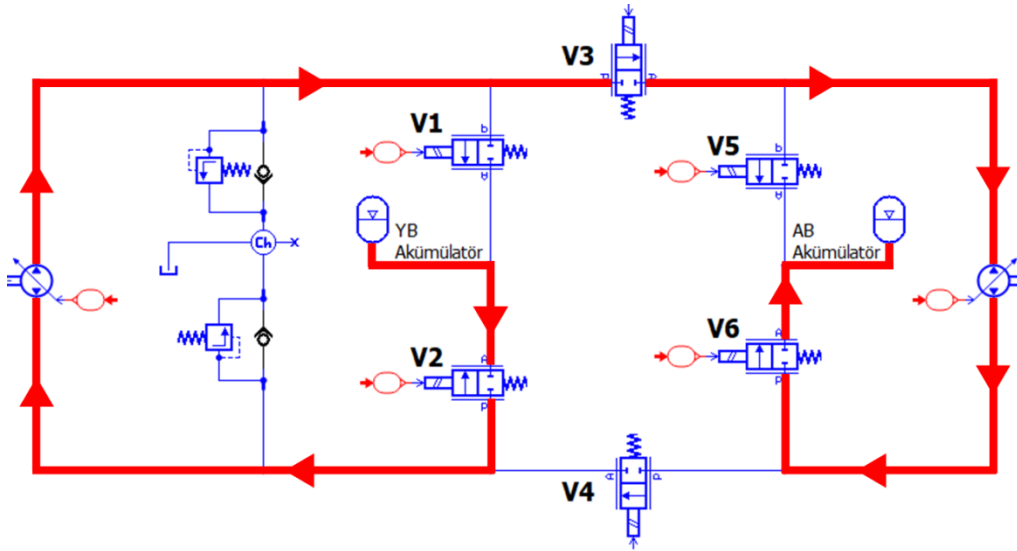
- İleri Yönlü Rejeneratif Frenleme
- Akümülatörler ile Geri Yönlü Rejeneratif İletim
- Geri Yönlü Rejeneratif Frenleme

Forkliftin verilen hız profiline uygun olarak hareket etmesi istenirken sistemdeki valflerin kontrolü ile enerji verimliliği arttırmak hedeflenmiştir. Kullanılan pompa/motor sayesinde güç iletimi sağlandığı gibi frenleme esnasında pompa/motor modu değiştirilerek güç kazanımı elde edilmiştir. Çalışma fazlarında genel olarak ileri ve geri yönlü frenleme esnasında oluşan kinetik enerji yön kontrol valfleri sayesinde YB akümülatöründe depolanır, ileri ve geri yönlü ivmelenme esnasında ise bu depolanan enerji kullanılmıştır.

Bu çalışma için oluşturulan hidrostatik iletim şeması genel olarak Şekil 9'da görüldüğü gibidir. Her bir çalışma fazı akış yönleri ile birlikte aşağıdaki başlıklar altında detaylı olarak verilmiştir.

4.2.1. Akümülatörler ile İleri Yönlü Rejeneratif İletim

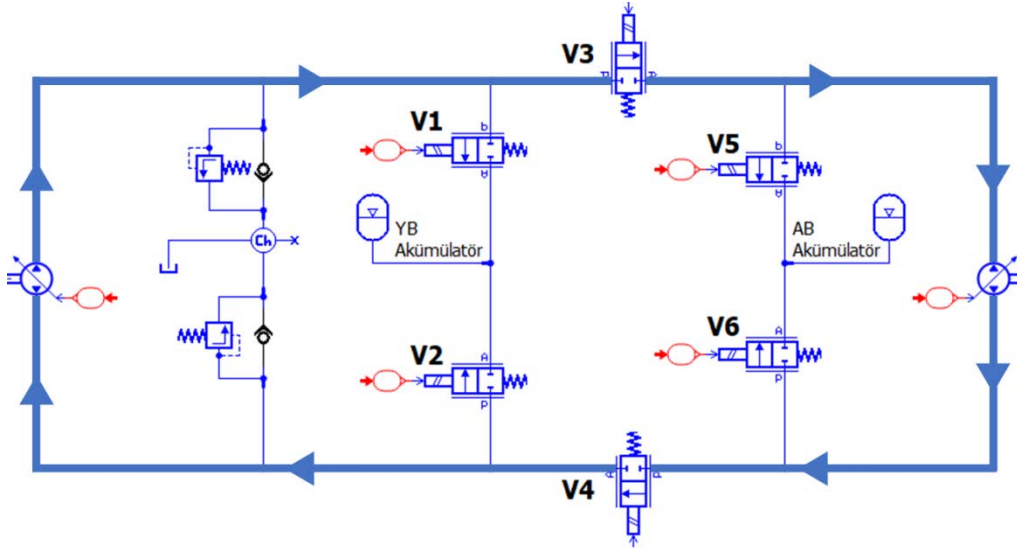
Faz 1: İleri yönlü ivmelenme fazında YP akümülatörü V2 valfi üzerinden deşarj olur ve akışkan v3 valfi üzerinden hidrolik pompadan iş yapan hidrolik motora iletilir ve sonrasında V6 valfi üzerinden AB akümülatöründe depolanır. Bu esnada diğer valfler tam kapalı durumdadır.



Şekil 9. Akümülatörler ile ileri yönlü rejeneratif iletim akış yönü

4.2.2. Normal İletim

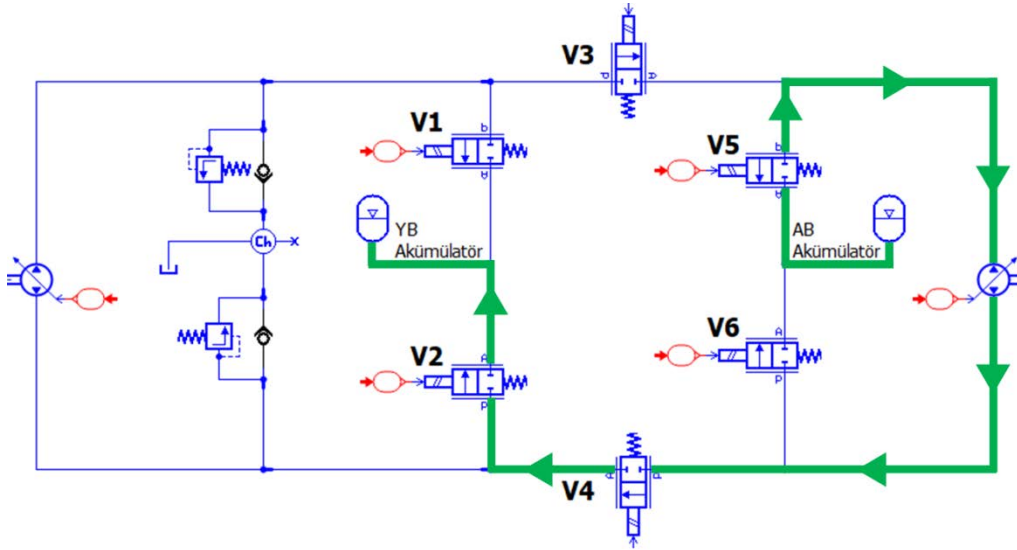
Faz 2: İleri yönlü normal fazda hidrolik pompada basınçlandırılan akışkan V3 valfinden geçerek hidrolik motora iletilir, V4 valfi üzerinden ise yeniden pompa ile basınçlandırılarak en basit prensip ile güç aktarımı sağlanır. Bu esnada diğer valfler kapalıdır.



Şekil 10. Normal iletim akış yönü

4.2.3. İleri Yönlü Rejeneratif Frenleme

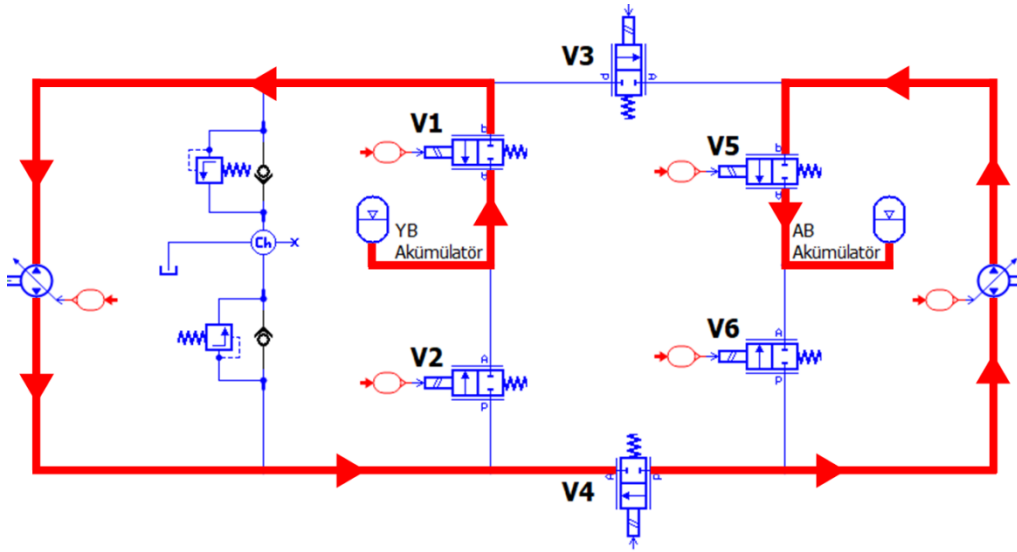
Faz 3: İleri yönde frenleme fazında hidrolik motor, pompa gibi davranarak kinetik enerjiyi alır, akışkan V5 valfi sayesinde AB akümülatöründen çıkıp V4 ve V2 valfleri üzerinden HP akümülatörüne iletilerek depolanır.



Şekil 11. İleri yönlü Rejeneratif frenleme akış yönü

4.2.4. Akümülatörler ile Geri Yönlü Rejeneratif İletim

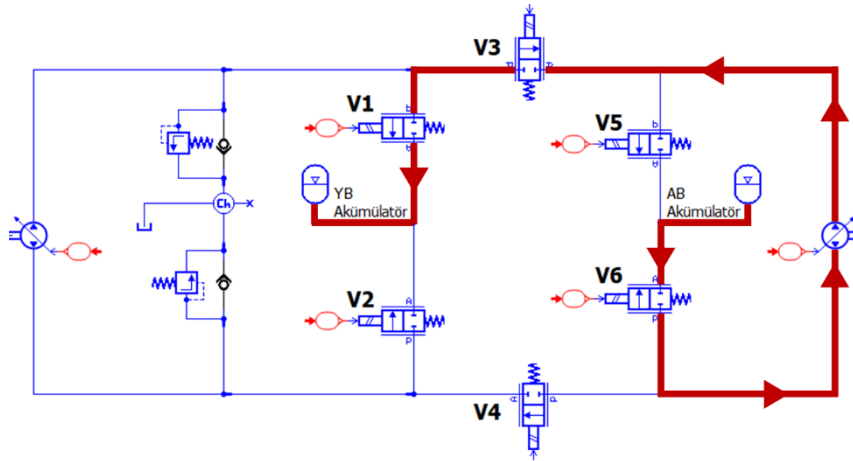
Faz 4: Geri yönlü ivmelenme fazında YP akümülatörü V1 valfi üzerinden deşarj olur ve akışkan V4 valfi üzerinden hidrolik pompadan iş yapan hidrolik motora iletilir ve sonrasında V5 valfi üzerinden AB akümülatöründe depolanır. Bu esnada diğer valfler tam kapalı durumdadır.



Şekil 12. Akümülatörlerle ilgili geri yönlü Rejeneratif iletim akış yönü

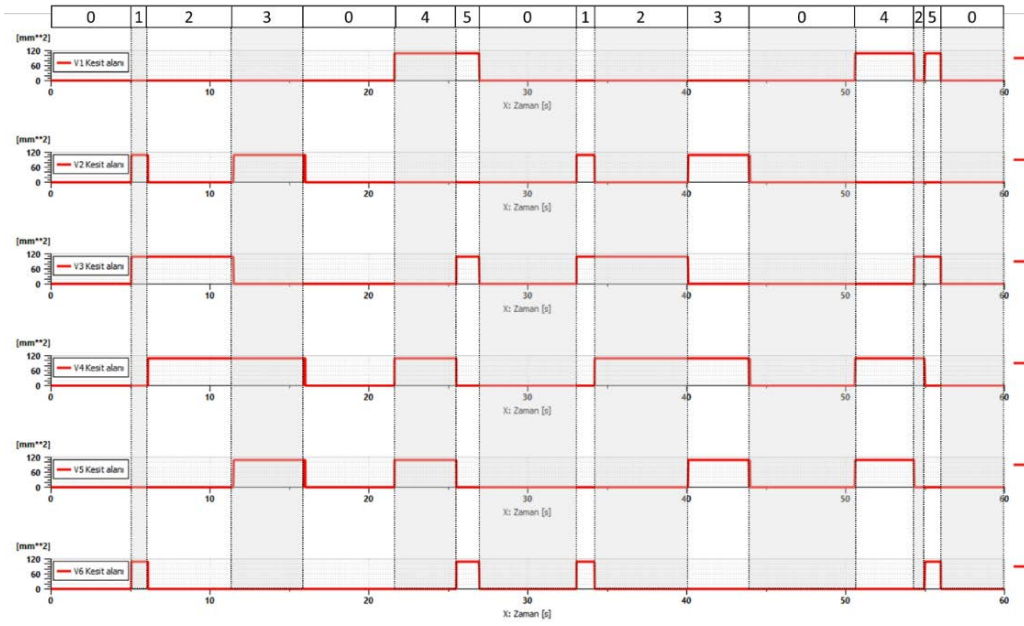
4.2.5. Geri Yönlü Rejeneratif Frenleme

Faz 5: Geri yönde frenleme fazında hidrolik motor, pompa gibi davranarak kinetik enerjiyi alır, akışkan V6 valfi sayesinde AB akümülatöründen çıkıp V3 ve V1 valfleri üzerinden HP akümülatörüne iletilerek depolanır.



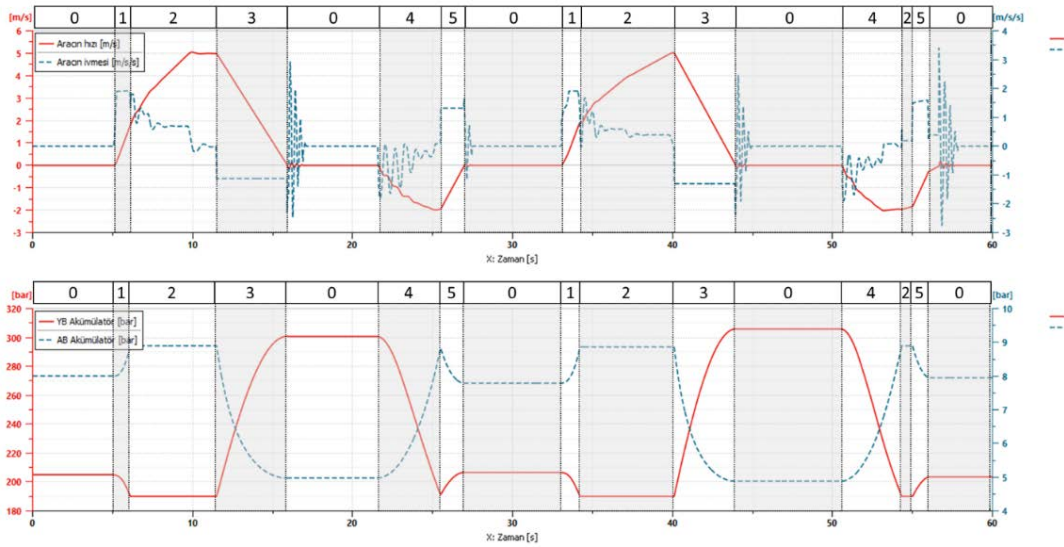
Şekil 13. Geri yönlü rejeneratif frenleme akış yönü

Forkliftin hareketi boyunca her bir çalışma fazında valflerin durumu Şekil 14'de görüldüğü gibi değişmektedir. Her bir çalışma fazında hangi valfin açık ya da kapalı olduğu zaman alanında bölümlendirilerek gösterilmiştir.



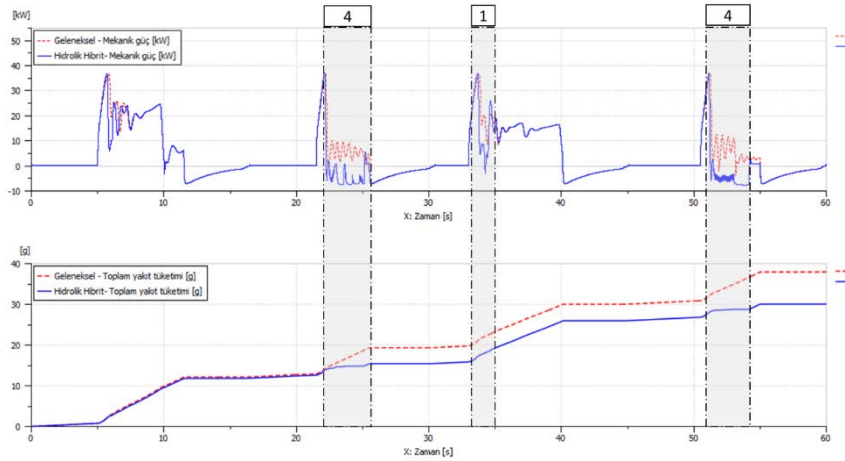
Şekil 14. Çalışma fazlarına göre valf durumlarının gösterimi

Forkliftin hız ve ivme değerlerine göre belirlenen çalışma fazları Şekil 14'de gösterilmiştir. Her bir çalışma fazında YB ve AB akümülatörlerindeki kinetik enerjinin depolanması ve kullanımı da Şekil 15 ile verilmiştir.



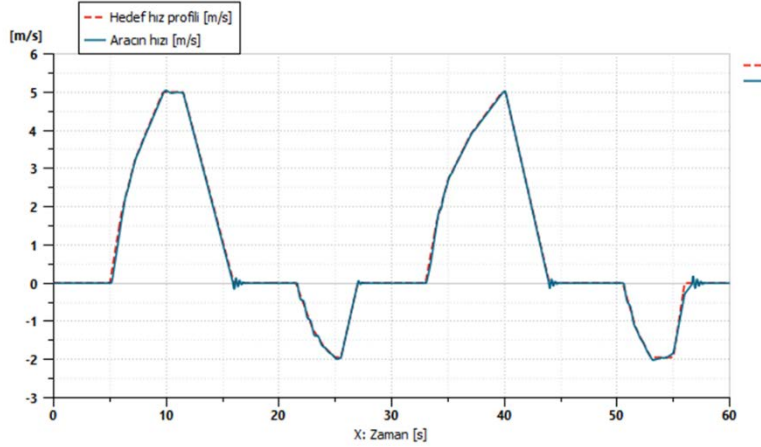
Şekil 15. Aracın zamana bağlı hız/ivme değerleri ve akümülatör basınçları

Geleneksel bir hidrostatik güç iletim sisteminde akış sadece V3 ve V4 valflerinin bulunduğu hat üzerinden gerçekleşir. Hidrolik devre üzerinde diğer valfler ve akümülatörler yer almaz. Aynı çalışma şartlarında geleneksel ve hibrit hidrolik sistemin güç iletim performansı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan yakıt tüketimi Şekil 16'da gösterilmiştir. Kullanılan içten yanmalı motorun tork, yakıt tüketimi, emisyon ve ısı kayıp tabloları IFP drive kütüphanesinde yer alan model ile hesaplanmıştır. IFP drive kütüphanesi, IFP Energies Nouvelles ile yapılan teknik iş birliği sonucunda geliştirilmiştir [5].



Şekil 16. Geleneksel ve hibrit hidrolik sistemde güç iletiminin ve yakıt tüketiminin karşılaştırılması

Hedef hız profili ve aracın hızı karşılaştırıldığında yakıt tüketiminde yaklaşık %20 iyileşme ile aracın beklenen performansı sağladığı görülmektedir.



Şekil 17. Hedef hız ve aracın hızının karşılaştırması

SONUÇ ve YORUMLAR

Hidrostatik iletim sisteminde geleneksel bir hidrolik devre ile güç aktarımı sağlanabilir. Ancak belirli bir çevrimde çalışan araçlarda iletim sırasındaki güç kayıpları doğrudan çalışma maliyetini etkileyecektir. Dört kadranlı pompa/motor sayesinde iletim sisteminde sonsuz aktarım oranı sağlanabilmektedir. Yapılan sistem benzetimi ile frenleme esnasında oluşan kinetik enerji hibrit hidrolik bir sistem sayesinde yeniden kullanılmak üzere depolanıp ivmelenme esnasında kullanılmıştır. Çalışma fazlarına göre valf kontrolleri sağlanarak %20 civarında bir yakıt tasarrufu sağlanabileceği ön görülmüştür.

Bu çalışma gerçekçi boyutlar dikkate alınarak yapılarak geleneksel bir aktarım ile kıyaslama yapılmıştır. Geleneksel bir hidrostatik iletim sistemi yerine hibrit hidrolik bir iletim sisteminin aracın performansına ve yakıt tüketimine etkisi incelenmiştir. İki adet pompa/motor arasına doğrusal ve çapraz hatlardaki akışı kontrol eden valfler yerleştirilmiştir. Kullanılan akümülatörler ile seri hibrit bir sistem kurulmuştur. VDI-2198 çevriminde aracın hızlanma ve frenleme şartlarına göre çalışma fazları elde edilmiştir. Valf kontrolü aracın hedef hız, çalışma modu, hidrolik motor hızı ve YB Akümülatör basıncına göre yapılmıştır. Sistemdeki enerjinin verimli bir şekilde depolanıp gerektiğinde yeniden kullanımı sayesinde ana güç kaynağından daha az enerji kullanarak istenen çalışma şartı sağlanabilmektedir.



Mevcut iletim sistemlerinin iyileştirilmesi adına sistem benzetimi ile hızlı öngörüler sağlanabilir. Ayrıca henüz tasarım aşamasında olan sistemlerin yakıt tüketimine, emisyon değerlerine kadar öngörü yapılabilmektedir. Farklı kontrol stratejileri ile daha verimli bir iletim sağlamak da mümkündür. Bu yaklaşım ile ürün geliştirme süreci hızlandırılarak tasarım varyasyonları kolaylıkla değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hydraulic Hybrid Vehicles, US EPA
- [2] "What Learned - Regenerative braking efficiency". www.proev.com, 2018-11-24.
- [3] H. M. Paynter. Analysis and design of engineering systems . MIT Press, Cambridge, MA, 1961
- [4] Costa, Gustavo K., Sepehri, Nariman, Hydrostatic transmission and actuators, John Wiley and Sons, 2015
- [5] Simcenter Amesim 2020.1 IFP-Drive Library Guide, SIEMENS

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Yosun

1987 yılında Bursa'da doğdu. Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2011' de onur derecesi ile bitirdi. 2018 yılında Bursa Teknik Üniversitesinde Yüksek Lisans programını tamamladı. 2012'de DTA Mühendislik firmasında Proje Mühendisi olarak iş hayatına başladı. Bilgisayar destekli analizler, sistem simülasyonları, titreşim-gürültü test sistemleri ve nümerik analizleri gibi konular üzerine çalıştı. Hali hazırda DTA Mühendislik firmasında Nümerik Analiz ve Simülasyon Bölümü Yöneticisi olarak çalışma hayatını sürdürmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

İzzet Özcan

1993 yılında Salihli, Manisa'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini burada tamamladı. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi'nden Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2018 yılında Bursa'da DTA Mühendislik firmasında proje mühendisi olarak ilk iş hayatına başladı. 2021 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü yüksek lisans programını tamamladı. 2021 yılının Mart ayından itibaren Ankara'da Nurol Makine ve Sanayi firmasında Analiz Mühendisi olarak görev yapmaktadır.