

# HİDROSTATİK REJENERATİF FRENLEME SİSTEMİ (HRB)

Taner HAMZAOĞLU

## ÖZET

Hidrostatik rejeneratif fren sistemi (HRB) ile Rexroth, hibrit konseptlerin avantajları ile hidrolik akümülatörlerin yüksek güç yoğunluğunu ticari araçlarda ve hareketli makinalarda ekonomik kullanım için bir araya getirmiştir. Sonuç yüzde 35'lere ulaşan yakıt tasarrufu. Sistem, ya seri imalattaki ya da hemen hemen seri imalata alınmak üzere olan bileşenlerden oluşmakta ve mevcut tahrik sistemlerine uyarlanması için sadece ufak tefek modifikasyonlar gerektirmektedir. Sonuç olarak HRB hem orijinal ekipman olarak mevcuttur, hem de araç filolarına uyarlanmaya uygundur.

**Anahtar Kelimeler:** Rejeneratif, fren, yakıt tasarrufu, enerji depolama,

## ABSTRACT

Hydrostatic regenerative brake system (HRB), the advantages of hybrid concepts with high power density of hydraulic accumulators for economic use in commercial vehicles and moving machines are integrated. The result: fuel economy reaching to 35 percent. System, or series of mass production in manufacturing, or nearly the components that will be formed and for the adaptation of existing propulsion systems require only minor modifications. As a result, the HRB is available as original equipment, vehicle fleets and suitable adapted.

**Key Works:** Regenerative, brake, fuel saving, energy storage,

## 1. TİCARİ ARAÇLARDA VE HAREKETLİ İŞ MAKİNALARINDA HİBRİT TEKNOLOJİSİNE ARTAN İLGI

Yakıt fiyatlarının yükseldiği dönemlerde, tahrik sistemlerinde yakıttan tasarruf teknolojileri giderek daha ilgi çeker olmuştur. Hibrit tahrik sistemleri sektöründeki mevcut etkinlikler büyük ilgi toplamaktadır. Hibrit tahrik sisteminin arkasındaki itici güçler, artan yakıt maliyetleri yanı sıra çevre koruma mevzuatı çerçevesinde artan çevre bilinci ve duyarlılığıdır.

Tüm hibrit konseptlerindeki temel ortak nokta, onların içten yanmalı motorları azami verimliliğin elde edilebildiği çalışma seviyelerinde çalıştırıyor olmaları gerçeğidir.

Bu sayede hem hibrit tahrik yakıt tüketimini düşer, hem de içten yanmalı motorun egzoz emisyonları önemli ölçüde azalır, çünkü arzu edilmeyen düşük verimli çalışma seviyeleri çoğunlukla ortadan kalkar [1].

HRB'de bu, fren enerjisinin geçici olarak depolanmasıyla sağlanır. İçten yanmalı motorun elverişsiz çalışma noktalarında tahrik sistemi depolanan enerjisi çeker.

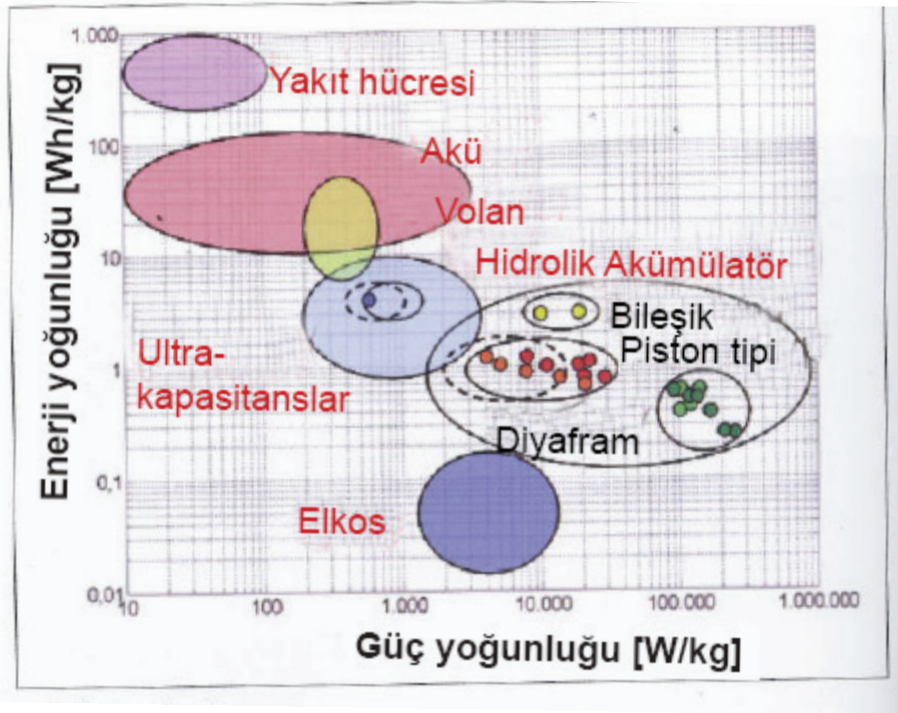
## 2. DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Akümülatörleri karakterize eden önemli parametreler güç yoğunluğu [W/kg] ve enerji yoğunluğudur [Wh/kg]. Ragone diyagramı (**Şekil 1**) her iki özelliği göstermektedir.

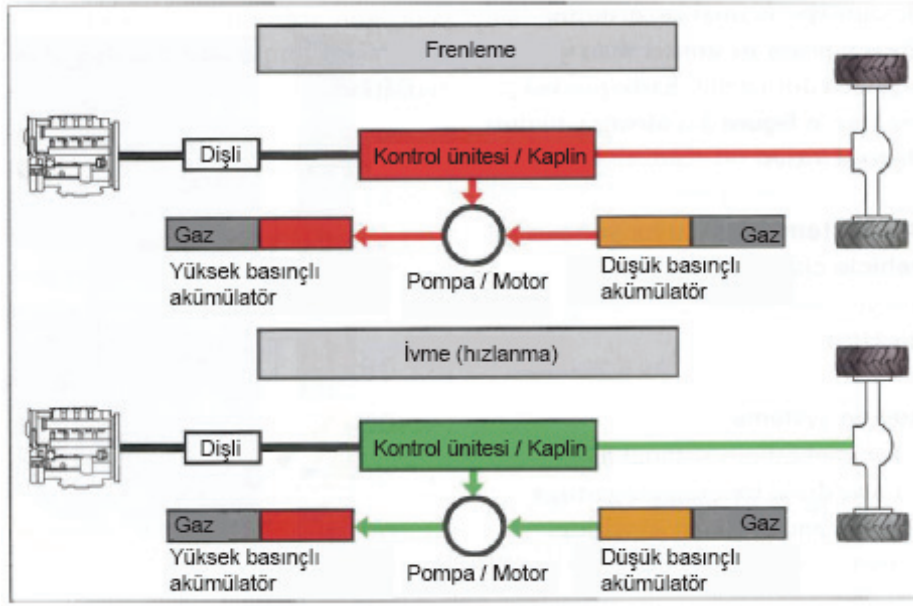
Teknolojinin bugünkü durumunda, elektrik depolama ortamının nispeten düşük güç yoğunluğu büyük bir sorundur. Yüksek iç dirençleri nedeniyle her iki yakıt hücresi ve aküler düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptirler ve fren enerjisinin geri kazanımı için uygunlukları sınırlıdır. Ayrıca döngüsel şarj ve deşarj durumları hizmet ömürlerini önemli ölçüde kısaltır.

Hidrolik diyaframlı akümülatörler, fren enerjisinin geri kazanımı açısından elektrik akümülatörlerine göre önemli avantajlara sahiptir. Bu tür akümülatörlerde gaz, yüksek mukavemetli malzemedan yapılmış bir diyafram içinde bulunur. Diyaframlı akümülatörler hemen hemen hiç bakım gerektirmez ve bu nedenle hidrolik uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Standart versiyonları 300 - 400 bar nominal basınçta çalışırlar.

Rexroth şimdi bu spesifik karakteristikleri kullanarak hibrit tahrikin avantajlarını ticari araçlara ve hareketli iş makinalarına sunmaktadır. Hidrostatik rejeneratif fren sistemiyle (HRB) Rexroth, frenleme esnasında üretilen ve başka şekilde kullanılmayan enerjiyi hidrolik akümülatöre yönlendiren bir sistem çözümü geliştirmiştir (Şekil 2). Müteakip hızlanma esnasında, akümülatör içten yanmalı motor üzerindeki yükü etkin şekilde azaltmak için yeterli enerjiyi kontrollü bir şekilde sağlar. Bunu dışında, Rexroth HRB konsepti, tahrik sisteminde sadece ufak tefek değişiklikler gerektirir, bu nedenle mevcut araç filolarına da HRB'yi uyarlamak mümkündür.



Şekil 1. Ragone Diyagramı.



Şekil 2. HRB Çalışma Sistemi

### 3. FREN ENERJİSİNİN GERİ KAZANIMI

HRB yardımıyla fren enerjisinin geri kazanımı, özellikle yoğun döngülü çalışan araçlar için önemlidir. Hatta ticari araçlar sektöründe imalatçılar uzun bir süredir kent içi çalışan otobüsler için hibrit tahrik sistemleri üzerinde çalışmaktadırlar. '80'li yıllarda otobüs imalatçıları hidrostatik fren sisteminin yüksek potansiyelini ortaya çıkaran testler gerçekleştirdiler. Bu teknolojiyi kullanarak Volvo, Stockholm şehir merkezinde mevcut yakıt tüketimini yüzde 30-35 oranında azaltan hidrolik akümülatör sistemli bir otobüs üretti [2]. '80 ortalarında da MAN ve Rexroth bir otobüse, kinetik enerjinin hemen tamamını depolayacak yüksek basınçlı depo ve aksel piston ünitelerinden oluşan bir rejeneratif fren sistemi kullanan hidrostatik güç bölmeli bir şanzıman uyarladılar. Artan ivme özelliği yanı sıra, çalışma sırasında yüzde 20'nin üzerinde bir yakıt tasarrufuna erişildi [3], [4], [5].

#### 3.1. Hidrolik Akümülatörün Çalışma Döngüsü

Şekil 3, bir hidrolik akümülatörün tam bir dolma / boşalma döngüsündeki temel hacim ve basınç değişim özelliklerini göstermektedir.

1. 2: Akümülatör doluyor ve hacim küçülmesi nedeniyle gaz basıncı artıyor. Basıncın artması gaz sıcaklığında bir yükselmeye yol açıyor.
2. 3:Durgun faz: Gaz, çevresine ısı yayıyor; hacim sabit kalırken basınç düşüyor.
3. 4: Akümülatörün boşalması: Hacim artarken akümülatör basıncı düşüyor. Bunlar olurken sıcaklık da azalıyor.
4. 1:Durgun faz: Ortamdaki ısı emilirken gazın basıncı da yükseliyor.



**Şekil 3.** Hidrolik Diyaframlı Akümülatörün Dolma / Boşalma Süreci.

Çünkü çalışmadığı safhadaki ısı kayıpları şarj esnasında kazanılandan daha büyüktür. **Şekil 3**'teki alan, ısı kayıpları ile aynıdır.

### 3.2. Çeşitli Araç Sınıfları İçin Sistem Varyantları

Rexroth, HRB için iki temel konsept sunar:

#### Ekleme Sistemleri

- Hidrostatik tahrikli yürüyüş sistemi bulunmayan uygulamalar. Örneğin, çöp kamyonları ve şehir-içi ve dağıtım hatlarında kullanılan ticari araçlar.

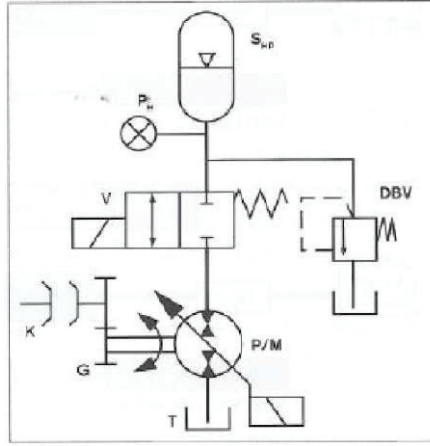
#### Entegre Sistemler

- Hâlihazırda mevcut bir hidrostatik tahrikli yürüyüş sistemi bulunan uygulamalar, örneğin hidrostatik forkliftler.

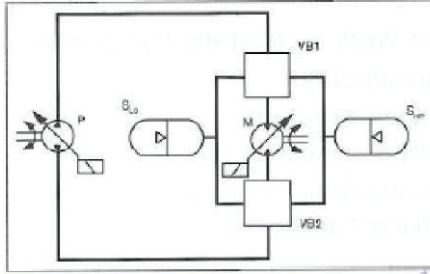
Ekleme sistemleri için Rexroth esas itibarıyla değişken debili aksel pistonlu pompalar kullanır. Aktarma organları ile fren sistemi arasındaki kaplin değişebilir:

Frenleme torku, aksel pistonlu pompanın debisini ayarlamak suretiyle kontrol edilir. Hidrolik sistem ve gerekli sistem bileşenlerinin genel bir şeması **Şekil 4**'te verilmiştir. Frenleme esnasında, çıkış miline akuple edilmiş değişken debili bir aksel pistonlu pompa (P/M) yüksek basınç rezervuarını (SHP) şarj eder. Bu yüksek basınç rezervuarı, hızlanma esnasında motoru (P/M) tahrik eder. Ara zamanlarda 2/2 yön valfi (V) kapalıdır. Ayrıca bir basınç tahliye valfi (DVB) akümülatörü korur.

Bir basınç sensörü, frenleme torkunun ve çalışma durumuna geçişlerin kontrolünü sağlar.



**Şekil 4.** Ekleme Sistemin Şeması



**Şekil 5.** Entegre Sistemin Şeması

Bu verilen uygulamadaki entegre sistemler mevcut hidrostatik devreyi kullanırlar (**Şekil 5**). Bu, hem çok motorlu tahrik sistemlerinde hem de hidromekanik güç dağıtım şanzımanlarda geçerlidir. Normal yürüyüş esnasında dört lojik valfin tamamı kapalıdır. Mod'a bağlı olarak LC1, 4 ya da LC2, 3 açılır. Hızlanma için, yüksek basınç rezervuarı hidrolik motor vasıtasıyla düşük basınç rezervuarına deşarj olur. Frenleme esnasında ise, motor, pompa gibi işlev görür ve düşük basınç rezervuarından yüksek basınç rezervuarına şarj sağlar.

#### 4. SİSTEM BİLEŞENLERİ

HRB için gereken bileşenler arasında, Rexroth ürün yelpazesinden seri ya da modifiye seri bileşenler yer alır. Bu, yüksek kullanılabilirlik ve yanı sıra tekrarlanabilir seri üretim kalitesi sağlar. Çok çeşitli bileşenler sayesinde Rexroth verilen uygulamaya özel sistem çözümleri sunabilmektedir. Buna ilişkin birkaç örnek verelim:

- Forklift  
10 ton, 85 kW, 23 km/saate kadar hızlarda HRB kullanır
- Çöp kamyonu  
25 ton, 200 kW, 25 km/saate kadar hızlarda HRB kullanır

#### 4.1. Akümülatörler

Rexroth, en uygun akümülatör ebadını depolanacak enerji miktarına göre belirler. Sistem tasarımı, hidrolik sistemin verimliliğini ve yanı sıra tekerleklerin dönüşü esnasındaki lastiklerin yuvarlanma direncinden oluşan enerji kayıplarını da dikkate alır. Böylelikle, seçilen iki sınıftan araçlar için gerekli akümülatör ebatları şöyledir:

	Hacim
Forklift	20 Litre
Çöp kamyonu	50 Litre

#### 4.2. Eksenel Pistonlu Üniteler

Eksenel pistonlu ünitenin seçimi, aracın frenleme esnasında ulaşması gereken güce (m araç kütlesine, v hızına, a ivmesine (hızlanmasına)) bağlıdır. Tipik ivme (hızlanma) değerleri, 1,0 ila 1,5 m/sn<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Eksenel pistonlu ünitenin Vg akışından ve p basıncından dönüştürdüğü güç, analog bir yöntemle hesaplanır. Bu, eksenel pistonlu üniteler için aşağıdaki boyutları verir:

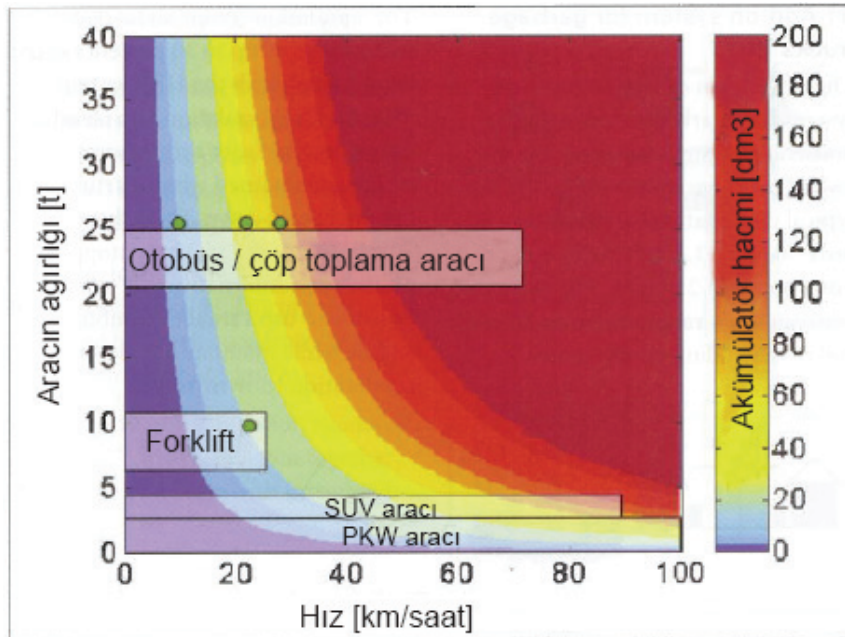
- Forklift

Entegre sistem: ilave hidrolik ünite gerekli değildir

- Çöp kamyonu

250 cm<sup>3</sup> / U

Bu varyantta, tahrik sisteminde yer alan pompanın kaplini o şekilde tasarlanmıştır ki frenleme için HRB'nin kullanılacağı zamana kadar araç Vmax azami hızında giderken pompa nominal devrinde çalışır.



Şekil 6. Akümülatör Seçimi.

### 4.3. Valfler ve Alçak Basınç Rezervuarları

Her iki sistem çözümü için hangi valflerin gerektiği, oluşan azami basınç seviyesinden ve valflerden mümkün olabilecek en düşük basınç kaybıyla geçmesi gereken akım miktarından belirlenir. Kapalı bir devre için imalatçı, ya düşük basınçlı diyaframlı bir akümülatör ya da ön gerilimli veya havalandırılmalı standart bir depo seçebilir. Alçak basınçlı diyaframlı bir akümülatörün boyutlandırması, yüksek basınçlı bir rezervuarın ebadının belirlenmesine benzer şekilde yapılır. Diğer taraftan, bir deponun hiç olmazsa yüksek basınçlı rezervuarın gaz diyaframının hacmindeki değişimden kaynaklanan hacmi alabilecek kapasitede olması gerekir. Bu nedenle, tanımlanan araç türleri için ortaya çıkan asgari alım kapasite boyutları şöyledir:

- Forklift  
6 litre
- Çöp kamyonu  
15 litre

## 5. ARAÇ SEÇİMİ VE SİMÜLASYON

HRB'nin çalışma prensibine göre, ilgili araç uygulamalarının sürüş döngüleri ve temel gereksinimleri potansiyel enerji tasarrufu için belirleyicidir. Bu nedenle, HRB ancak, aracın tipik bir iş döngüsünde yeterli fren enerjisi mevcutsa ve enerji geri kazanımı ekonomik olarak gerçekleştirilebilecekse faydalıdır. Durumun böyle olduğundan emin olmak için, ekonomik ve teknolojik olarak faydalı HRB uygulamaları seçerken aşağıdaki parametreler analiz edilip değerlendirilmelidir:

- Araç kütlesi
- Yuvarlanma direnci ve hava direnci
- Araç hızı (bir frenleme işleminin başındaki ve sonundaki hız)
- Yavaşlama
- Frenleme aralığı (frenleme işleminin frekansı)

Aracın kendi ağırlığı, aracın üzerinde ilerlediği zemin ve erişilen hız yanı sıra aracın operasyonel döngüsü de yakıt tasarruf miktarında önemli bir rol oynar. Bir çöp kamyonu bir durak noktasından yola koyulur, hızlanır ve bir sonraki durak noktasında tekrar fren yapar. Çöp toplama noktaları arasında hızı 25 km/ saate ulaşan bir çöp kamyonu (ağırlığı 26 ton, gücü 205 kW, sürüş anında ortalama yakıt tüketimi 10 lt/saat) için, çöp toplama noktaları arasındaki uzaklığa bağlı olarak yakıt tasarrufu yüzde 15 ile 30 arasında değişir. Bir forklift için de yük yükleme ve boşaltma noktaları arasındaki ilerleme yolunun etkisi büyük önem taşır.

Bu nedenle, yoğun çalışma döngülerine sahip aşağıdaki araçlar için bir hidrostatik fren sisteminin kullanımı özellikle ilgi çekicidir:

- Forkliftler
- Çöp kamyonları
- Bölgesel ve mal dağıtım trafiğinde kullanılan ticari araçlar

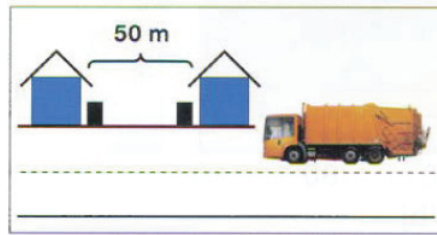
Araç modellerinin gerçekçi simülasyonları, geleneksel tahrik sistemlerine kıyasla tüketimde önemli ölçüde tasarruf sağlamak için HRB sisteminin kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu simülasyonlar için Rexroth, AMESim simülasyon cihazında karakteristik tüketim eğrilerine sahip dizel motorlar kullanılmaktadır.

Aşağıda, bir çöp kamyonu (eklenli sistem) ve bir forkliftin (entegre sistem) örnek olarak kullanıldığı simülasyonlardan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

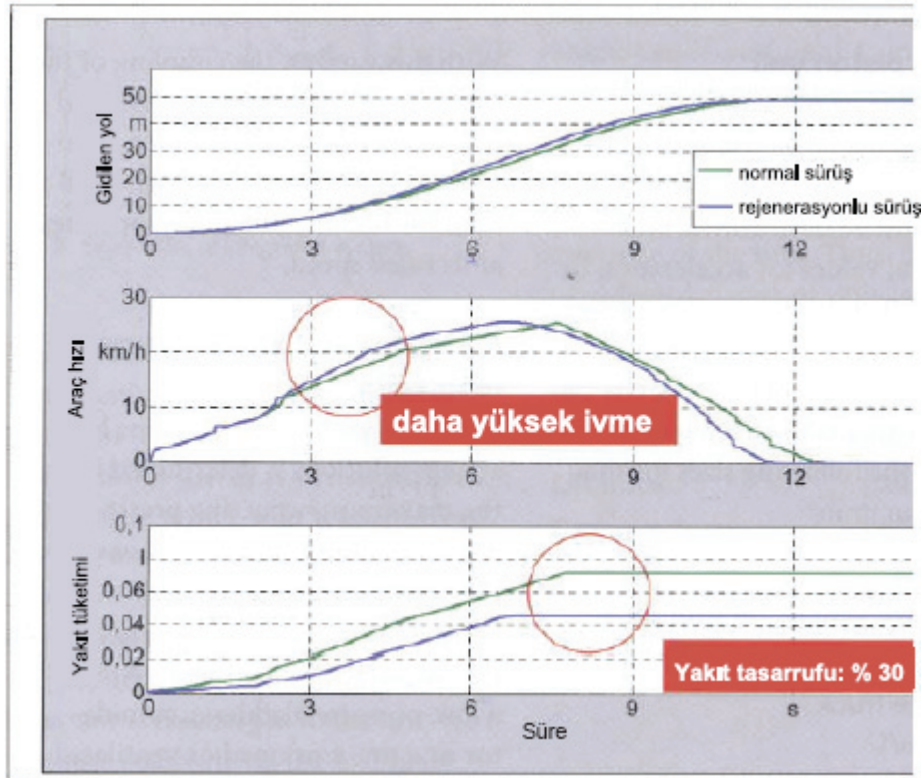
### 5.1. Çöp Kamyonları İçin Eklenli Sistem

Ev atıkları için kullanılan bir çöp kamyonu için bir HRB eklenli sisteminin simülasyonu şu döngü parametrelerine dayanır (**Şekil 7**): Tipik yavaşlama ve hızlanma değeri yaklaşık  $-0,65 / +1,4$  m/ sn<sup>2</sup>, azami hız ise 25 km/saat. Duraklar arası mesafe güzergâha bağlı olarak 30 ile 100 metre arasında değişiyor.

Simülasyon sonuçları HRB sistemiyle yüzde 30'a kadar yakıt tasarrufu sağlandığını göstermektedir (**Şekil 8**). Simülasyon, hibrit sürüş başlatılırken daha yüksek ivmeler elde edildiğini de göstermektedir. Buna göre, bir sonraki durak noktasına HRB daha çabuk ulaşmaktadır. Diğer bir ifadeyle, ivmenin aynı kalması, daha küçük bir motor kullanılarak sağlanabilecektir (boyut küçültme).



Şekil 7. Çöp Kamyonu Döngüsü.



Şekil 8. Çöp Kamyonu Simülasyon Sonuçları



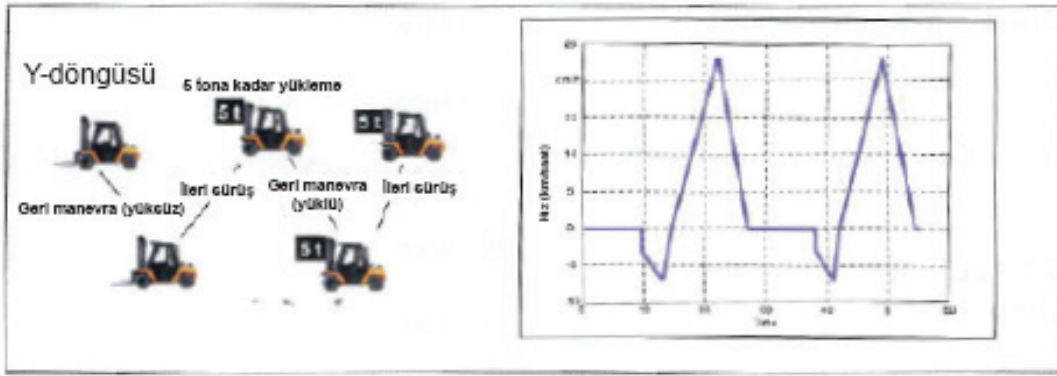
## 5.2. Forkliftler İçin Entegre Sistem

Simülasyona temel olarak, hidrostatik yürüyüş sistemli on- tonluk bir forklift alınmıştır. Bu amaçla, daha önce açıklanan entegre sistem hidrolik devreye monte edilmiştir.

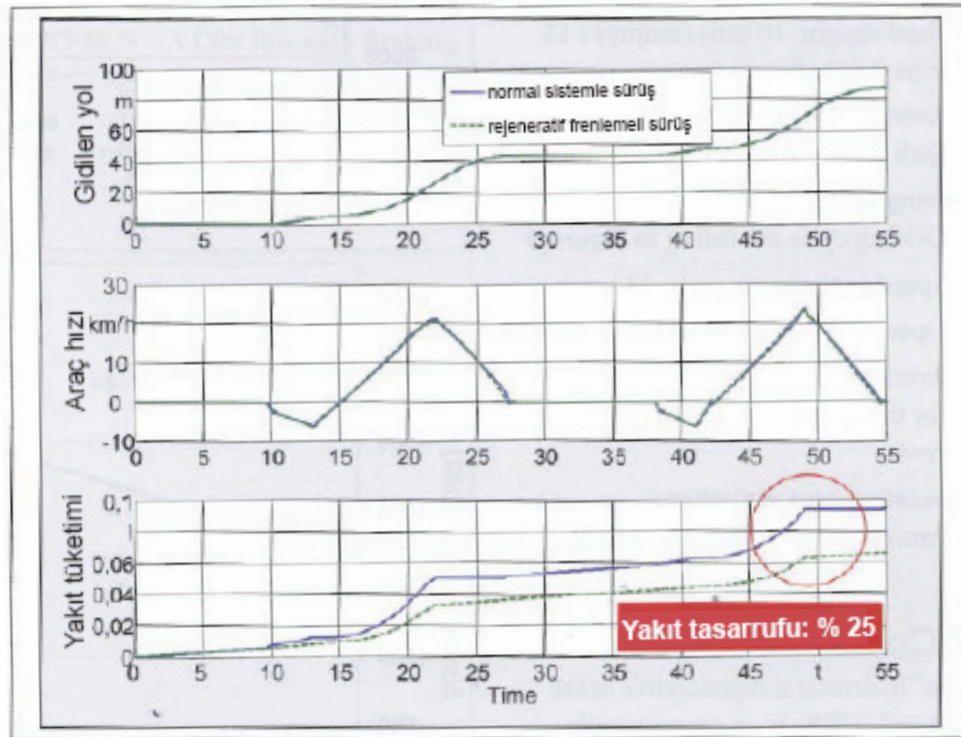
İş döngüsü olarak tipik bir yükleme döngüsü belirlenmiştir (**Şekil 9**). Bu döngü sırasında forkliftin hızı azami seviyeye (23 km/saat) çıkar.

**Şekil 10'da** "normal" bir sürüşün simülasyon sonuçları, entegre HRB'li bir sürüşünkilerle birlikte gösterilmiştir.

Sonuçlar göstermiştir ki, hidrolik devreye entegre edilmiş bir HRB ile yüzde 25'e varan yakıt tasarrufu sağlanmıştır.



**Şekil 9.** Forklift İş Döngüsü (Mesafe ve Hız Profili).



**Şekil 10.** Forklift Simülasyon Sonuçları

## 6.1. Uygulama Örneği Çöp Kamyonu

### İşletim maliyeti analizi için varsayımlar:

- Motor gücü: 205 kW
- Toplam ağırlık: 26 ton
- Ortalama yakıt tüketimi "sürüş": 10 Litre/saat, yakıt fiyatı: 1,15 EURO/litre

### Sürüş döngüsü:

- Toplam süre: 510 saat, bunun 300 saati iş, 210 saati sürüş
- Çöp toplama noktaları: 9 durak
- İş döngüsünde hız: 25 km/saat
- Çalışma saati: 2.500 saat/yıl, bunun yılda 1.875 saati şehir içi trafiği içinde
- Verilen sürüş döngüsünde HRB'den kaynaklanan yakıt tasarrufu: yüzde 25

### İşletim maliyetinde azalma:

- Yıllık yakıt tasarrufu: 5.390 EURO
- Fren aşınmasındaki azalma nedeniyle maliyette yaklaşık yüzde 30 ek tasarrufu

## 6.2. Uygulama Örneği:

### Forkliftler

### İşletim maliyet analizi için varsayımlar:

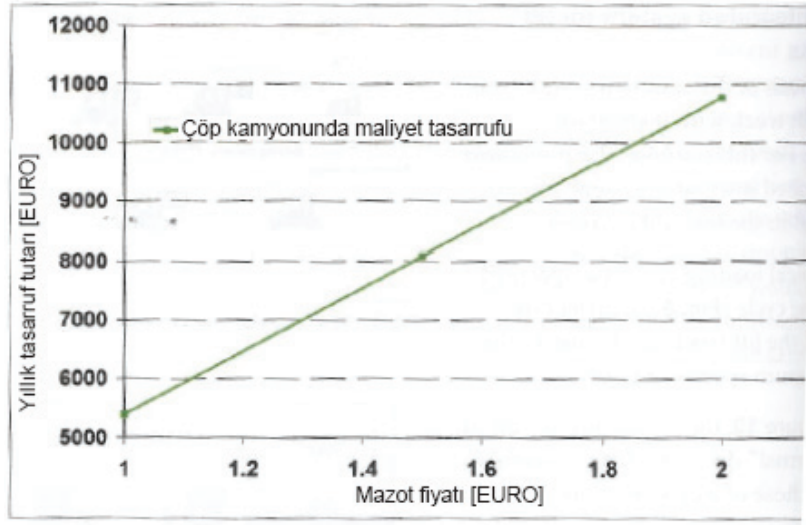
- Motor gücü: 85 kW
- Toplam ağırlık: 10 ton (boş) / 15 ton (yükü)
- Ortalama yakıt tüketimi: 5 Litre/ saat, yakıt fiyatı: 1,15 EURO/litre

### Sürüş döngüsü:

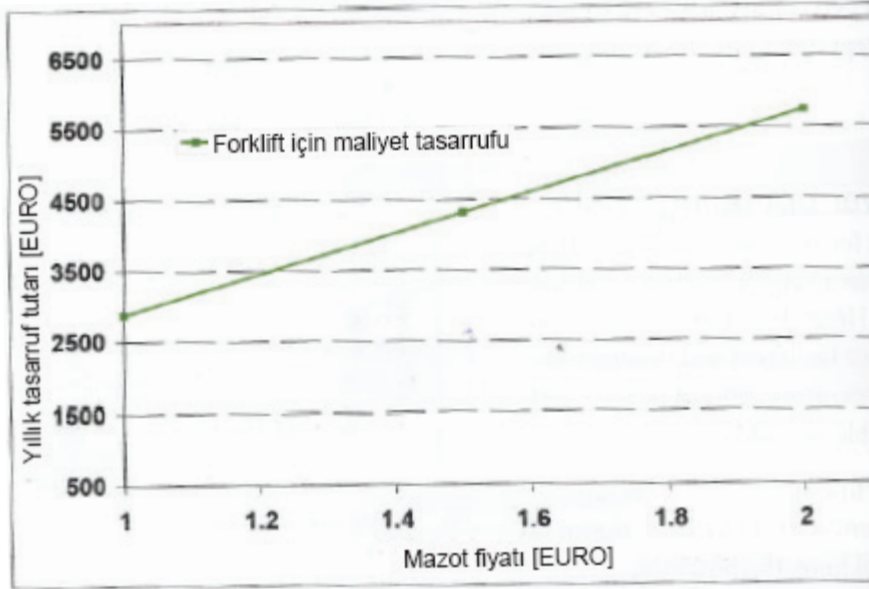
- Sürüş döngüsü: Şekil 9'a göre
- İş döngüsünde hız: 23 km/saat
- Çalışma saati: 2.000 saat/yıl
- Verilen sürüş döngüsünde HRB'den kaynaklanan ortalama yakıt tasarrufu: yüzde 25

### İşletim maliyetinde azalma:

- Yıllık maliyet tasarrufu: 2.875 EURO



Şekil 11. Çöp Kamyonunda Maliyet Tasarrufu



Şekil 11. Forklift İçin Maliyet Tasarrufu

## SONUÇ

"Hidrostatik rejeneratif fren sistemi" (HRB) fren enerjisinin geri kazanımını sağlayan ekonomik açıdan önemli bir çözümdür ve hibrit tahrik sistemlerinin tasarruf potansiyellerinin ticari araçlara ve hareketli iş makinelerine uyarlanmasını mümkün kılar. Seri ya da modifiye edilmiş seri bileşenlerden oluşan bileşen kombinasyonlarıyla Rexroth belirli araç tipleri için oldukça güvenilir ve özelleştirilmiş sistem çözümleri yapılandırabilmektedir. HRB'nin, tahrik sistemine entegrasyonu sadece ufak tefek modifikasyonlarla yapılabilmektedir ve dolayısıyla hesaplı HRB uyarlamasına olanak sağlayarak bu çözüme kapıları açmaktadır.

Bir HRB kullanımıyla ulaşılan yakıt tasarrufunun, böyle bir sistemin ilavesi için yapılan ek masraflarla karşılaştırılması gerekir. Araç tipine, sistemine ve sürüş döngüsüne bağlı olarak bu maliyetler çeşitli oranlarda amorti edilebilmektedir.

Çöp kamyonları ve forkliftlerde olduğu gibi son derece kısa iş döngüleri için HRB kullanımı yakıt tüketiminde yüzde 35 azalmaya yol açar. Bu tasarrufların geri kazanımı zamana bağlıdır, buna karşılık HRB sisteminin ilavesi için gereken düşük masrafın derhal ödenmesi gerekir.

Bir bakışta rejeneratif fren sisteminin avantajları:

- Fren enerjisinin hidrolik olarak geri kazanımından dolayı tüketimde %35'e varan azalma
- Emisyonda aynı oranda azalma
- Hidrolik frenleme sonucu fren aşınmasında ve ince toz partikül oluşumunda azalma
- Hidrolik yükseltimi sonucu araç hızlanmasında gelişme veya araç motorunu küçültme olasılıkları
- Basit sistem entegrasyonu yanı sıra araç güçlendirme olasılığı
- Sistem bileşenlerinde düşük maliyetler

## KAYNAKÇA

- [1] John M. Miller, Miller J-N-J, Design Services, Comparative Assessment of Hybrid Vehicle Power Split Transmission, 4. VI Winter Workshop Series, 2005.
- [2] "Regenerative Braking for Buses Gives Big Fuel Saving", D. Scott, J. Yamaguchi, sayfa 95-99, Automotive Engineering, cilt 92, No. 10, Ekim 1984.
- [3] F. Korkmaz, H.-P. Willumeit, B. Benneter, Th. Thier: Stadtlinienbus mit hydrostatischer Bremsenergieerückgewinnung (HYDROBUS); (City Line Bus with Hydrostatic Recovery of Braking Energy). Hydraulik und Pneumatik, 23 (1979). No. 7, sayfa 520522, Krausskopf-Verlag, Mainz.
- [4] Ch. Anderson, R. Paulsen, H.-R Willumeit: Entwicklung von Prototypfahrzeugen mit hydrostatischer Bremsenergieerückgewinnung (Development of Prototype Vehicles with Hydrostatic Braking Energy Recovery)
- [5] HYDROBUS, Ergebnisse der Fahr- und Prüfstandsversuche (HYDROBUS, Results of Driving and Bench Tests)
- [6] P. Willumeit, B. Bennter: HYDRO-BUS - A City Bus with Braking Energy Recovery. Proc. XIX. Int. FISITA Kongresi, Cilt 2, Tebliğ No. 82065, 1982, Melbourne, Avustralya.

## ÖZGEÇMİŞ

### Taner HAMZAOĞLU

16.03.1980 tarihinde İstanbul'da doğmuştur. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 2006 yılı nisan ayından beri Bosch Rexroth Türkiye Mobil Hidrolik Departmanı'nda proje ve satış mühendisi olarak çalışmaktadır.