

ÇİFT MODLU U TİPİ HİDROSTATİK TRANSMİSYON

Mert EKİMCİ

ÖZET

Gelişmekte olan ekonomilerdeki hızlı büyüme, düşük maliyetli, kompakt ve düşük teknoloji tarım makineleri ile ekipmanlarına yönelik kayda değer bir talep doğurmuştur. Fiziksel olarak küçük boyutlara sahip olmalarına rağmen, bu makineler yaygın kullanımları nedeniyle toplamda ciddi düzeyde enerji tüketimine yol açmaktadır. Bu durum, özellikle verimliliği artıracak ve enerji tüketimini azaltacak yenilikçi transmisyon sistemlerinin bu segmentte uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Söz konusu makineler, hâlihazırda daha büyük ve gelişmiş tarım araçlarında kullanılan sürekli değişken oranlı hidrostatik (HST) ve hidro-mekanik (HMT) transmisyonların sunduğu performans ve verimlilik kazanımlarından önemli ölçüde fayda sağlayabilir.

Bu çalışma, ticari olarak temin edilebilen U tipi entegre bir HST ünitesi temel alınarak geliştirilen, çift modlu bir HST/HMT transmisyon sisteminin tasarımını ve uygulamasını ele almaktadır. Söz konusu transmisyon, düşük güçlü tarım ekipmanları için hem verimli hem de maliyet açısından sürdürülebilir bir çözüm sunmak amacıyla hazır bileşenler kullanılarak yapılandırılmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler, sistemin hidro-mekanik modda çalıştığında, yalnızca U tipi HST ünitesine kıyasla yaklaşık yüzde beş oranında daha yüksek bir verimlilik sağladığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Hidrostatik Transmisyon (HST), Hidro-mekanik Transmisyon (HMT), Çift Modlu Transmisyon, U Tipi HST, Tarım makineleri, Verimlilik

ABSTRACT

The rapid growth observed in developing economies has led to a significant demand for low-cost, compact, and low-tech agricultural machinery and equipment. Despite their small physical size, these machines cause considerable levels of energy consumption due to their widespread use. This situation highlights the need for the implementation of innovative transmission systems that can enhance efficiency and reduce energy consumption in this segment. Such machines can benefit significantly from the efficiency and performance gains offered by continuously variable hydrostatic (HST) and hydro-mechanical (HMT) transmissions, which are commonly found in larger and more advanced agricultural vehicles.

This study examines the design and implementation of a dual-mode HST/HMT transmission system, developed based on a commercially available U-style integrated HST unit. The transmission was constructed using off-the-shelf components, aiming to provide an efficient and cost-effective solution for low-power agricultural equipment. Laboratory testing has demonstrated that, in hydro-mechanical mode, the system delivers approximately a five percent improvement in efficiency compared to the standalone U-style HST unit.

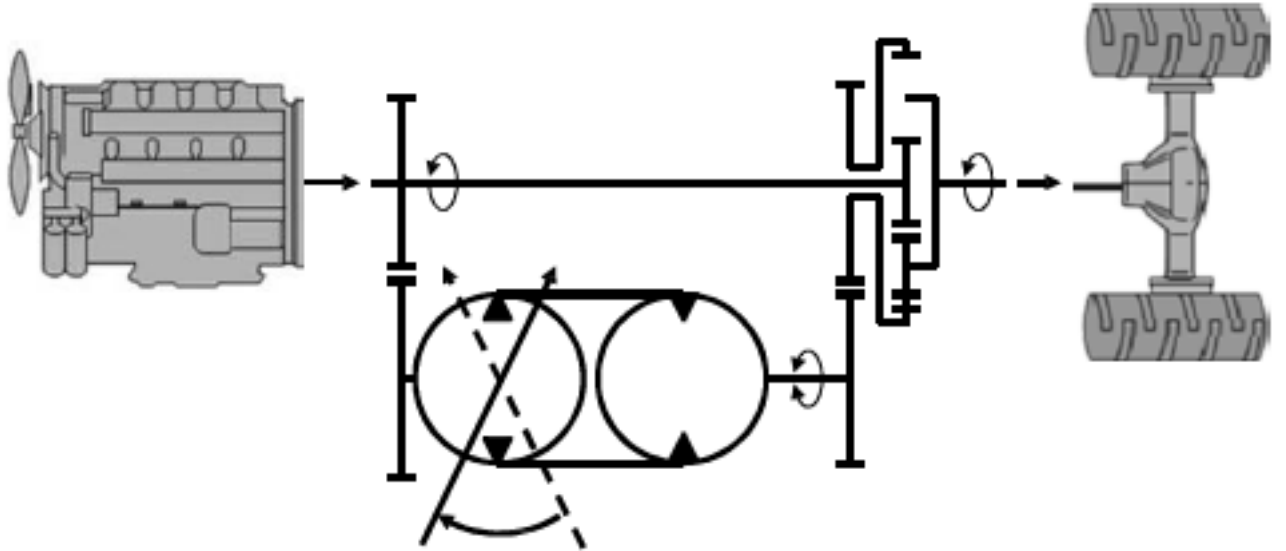
Key Words: Hydrostatic Transmission (HST), Hydro-mechanical Transmission (HMT), Dual-mode Transmission, U-style HST, Agricultural Machinery, Efficiency

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ekonomilerde mekanizasyon oranının artmasıyla birlikte, artan yakıt maliyetleri ve giderek katılan emisyon regülasyonları, arazi araçlarında daha yüksek enerji verimlilik ihtiyacını kritik hale getirmiştir. Bu pazarlarda yaygın olarak kullanılan ekipmanlar genellikle daha küçük boyutlu, düşük maliyetli ve düşük verimlilik düzeyine sahiptir. Bu koşullarda sağlanacak verimlilik artışı, hem işletme maliyetlerinin ve emisyonların azaltılmasına, hem de son kullanıcı açısından üretkenlik ve kârlılığın artırılmasına olanak tanır.

Arazi araçlarının enerji verimliliğini artırmak amacıyla yaygın biçimde başarıyla uygulanan sistemlerden biri, güç bölmeli hidro-mekanik transmisyon (HMT) yapısıdır. Farklı mimarilerle tasarlanabilen bu sistemlerin ortak noktası, mekanik ve hidrostatik güç iletim yollarının paralel olarak bulunması ve bu yolların en az bir planet dişli takımı üzerinden birleştirilmesidir. Bu yapı, mekanik tahrik hattının yüksek verimliliğini, hidrostatik sistemlerin kesintisiz değişken hız kapasitesiyle birleştirerek, hem verimli hem de sonsuz değişken oranlı bir güç aktarımı sağlar [1]. Böylece, motorun tüm yük koşullarında optimum çalışma noktalarında işletilmesi mümkün hale gelir.

Bu çalışmada kullanılan HMT konfigürasyonu, Girişten Eşleşmeli düzenlemedir (Şekil 1). Bu yapıdaki sistemlerde, ilk hidrostatik ünite (değişken deplasmanlı olmak zorundadır) ile üç elemanlı planet dişli sisteminin bir parçası (örneğin güneş dişlisi) doğrudan transmisyon girişinden tahrik edilir. İkinci hidrostatik ünite (genellikle sabit deplasmanlı) planet sisteminin diğer bir elemanına (örneğin halka dişli) bağlanır. Üçüncü eleman (örneğin planet taşıyıcı), transmisyon çıkışına bağlanarak nihai tahrik çıkışını oluşturur[1].



Şekil 1. Giriş bağlantılı HMT yapısı

2. DÜŞÜK GÜÇLÜ HMT TASARIMI

Yapılan çalışmalar ile kompakt ve düşük güçlü bir hidro-mekanik transmisyon (HMT) geliştirilmiştir. Bu transmisyon, esas olarak çim bakım sektörüne yönelik tasarlanmış U-şekilli bir hidrostatik transmisyonun, girişten eşleşmeli konfigürasyonda bir planet dişli takımıyla entegre edilmesiyle oluşturulmuştur. Geliştirilen bu yapı, bu çalışmada sunulan çift modlu transmisyon tasarımının temelini oluşturmaktadır.

U-şekilli hidrostatik transmisyon; değişken deplasmanlı bir pompa ile sabit deplasmanlı bir motorun tek bir gövde içerisinde paketlenmiş haliyle tasarlanmıştır (Bkz. Şekil 2). “U-şekilli” ifadesi, giriş ve çıkış millerinin transmisyonun aynı tarafında yer alması nedeniyle kullanılmaktadır. Alternatif HST düzenlemeleri arasında; giriş ve çıkış millerinin genellikle eş merkezli olacak şekilde transmisyonun karşılıklı yüzeylerinde yer aldığı doğrusal (in-line) yapı ve millerin eksensel olarak ötelenmiş şekilde karşılıklı konumlandığı Z-şekilli yapı yer almaktadır.

Bu transmisyonda kullanılan HST ünitesinin giriş mili, gövde boyunca geçerek her iki tarafta bağlantı imkânı sağlar. Bu tasarım sayesinde motor gücü hem makinenin diğer fonksiyonlarına iletilebilir, hem de U-şekilli ve Z-şekilli yerleşimlere uyum sağlanabilir. Bu mil yerleşimi aynı zamanda, hidrostatik ünitenin planet dişli takımının güneş ve iç dişli (ring) elemanlarına kolaylıkla entegre edilerek hidro-mekanik transmisyonun oluşturulmasına olanak tanır.

Bu çalışmada uygulanan girişten eşleşmeli HMT mimarisi kapsamında, U-şekilli HST’de yer alan değişken deplasmanlı pompa birinci hidrostatik ünite, sabit deplasmanlı motor ise ikinci hidrostatik ünite olarak görev yapmaktadır. Yazının kalanında, bu iki birim sırasıyla “pompa” ve “motor” olarak anılacaktır. Ancak, transmisyonun çalışma aralığı boyunca hem pompa hem de motorun, farklı işletim noktalarında hem pompalama hem de motordama kipinde çalıştığı özellikle not edilmelidir.



Şekil 2. U tipi Hidrostatik Dişli Kutusu

Girişten eşleşmeli mimariye sahip çoğu HMT uygulamasında, aracın geri yönde çalıştırılabilmesi için mekanik bir geri sürüş düzeneği, motorla transmisyonu birbirinden ayırarak boş (neutral) pozisyonu sağlayabilmek içinse bir debriyaj mekanizması gereksinimi ortaya çıkar. Ancak, belirli tasarım stratejileriyle bu işlevler ek mekanik bileşenlere ihtiyaç duymadan da sağlanabilir.

İlk nesil düşük güçlü HMT tasarımında, hidrolik motor ile planet sisteminin halka dişlisi arasındaki dişli oranı, pompanın belirli bir negatif deplasman değerine ayarlanmasıyla, planet taşıyıcının çıkış hızının sıfırlanmasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bu durum literatürde “dişli boşu” (geared neutral) olarak adlandırılır [1]. Pompa daha yüksek negatif deplasmanla çalıştırıldığında, planet taşıyıcı bu kez ters yönde dönmeye başlar, böylece geri sürüş elde edilir.

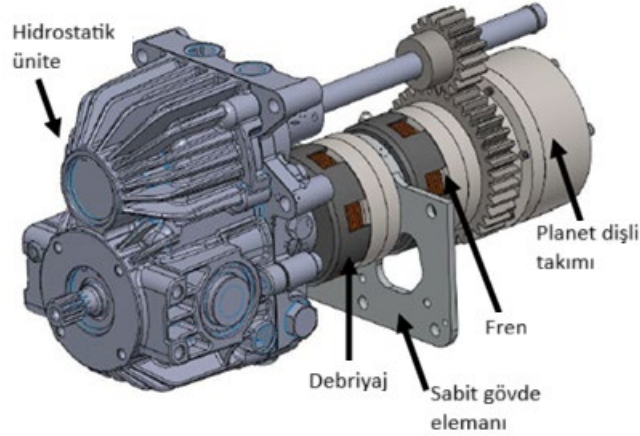
Bu yapı, sistemin boyutunu ve karmaşıklığını azaltma avantajı sağlarken, aynı zamanda belirli performans sınırlamalarını da beraberinde getirir. Geri yöndeki maksimum hız değerini artırmak amacıyla motor ile halka dişli oranı büyütüldüğünde, bu durum kaçınılmaz olarak ileri yöndeki maksimum hızı da artırır. Sonuç olarak ya hassas hız kontrolü zorlaşır ya da transmisyon

kapasitesi tam olarak değerlendirilemez. Araç gereksinimlerine bağlı olarak bu durum, her iki yöndeki sürüş performansının da kabul edilemez seviyelere düşmesine neden olabilir.

Bununla birlikte, “dişli boşu” çözümünün, motor çalışırken aracı hareketsiz tutmak için kullanılması da sistemsal bir zorluktur. Çıkış milinin sıfır hızda tutulabilmesi, halka dişlinin dönüş hızının yüksek hassasiyetle kontrol edilmesini gerektirir ki bu, hidrostatik pompa kontrol mimarisi göz önüne alındığında her zaman mümkün olmayabilir. Bu hassasiyet sağlanamadığında, araç ileri veya geri yönde istenmeyen yavaş hareket (sürünme) sergileyebilir [5]. Bu durum sadece motor ile transmisyonun debriyaj vasıtasıyla ayrılmasıyla tamamen ortadan kaldırılabilir ve potansiyel güvenlik risklerini engelleyebilir.

3. ÇİFT MOD GELİŞİMİ

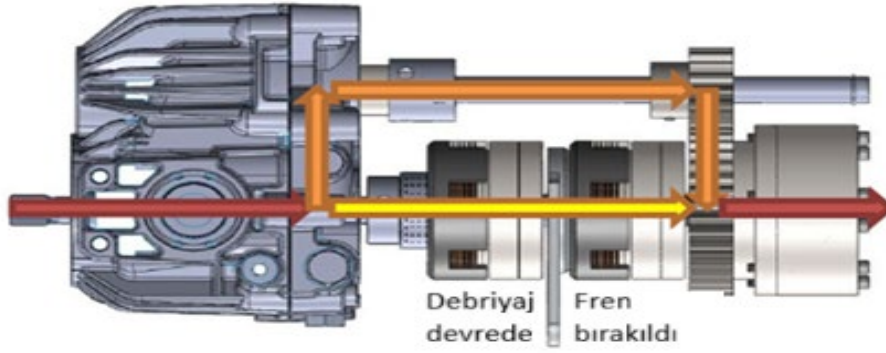
Transmisyon aralığı ve aracın sürünme hareketi (creep) gibi iki temel sorunu ele almak amacıyla, dişli kutusu girişi ile planet dişli sisteminin güneş dişlisi arasındaki mile, standart olarak temin edilebilen hidrolik tahrikli bir kavrama ve fren yerleştirilerek bir transmisyon tasarımı geliştirilmiştir (Şekil 3). Bu konfigürasyon, hem hidro-mekanik hem de hidrostatik çalışma modlarına olanak tanımaktadır. Hidro-mekanik mod, yalnızca ileri yönlü tahrik sağlar; bu da tarla operasyonları sırasında daha yüksek verimlilik ve araç hız aralığının optimize edilmesine imkân tanır. Hidrostatik mod ise hem ileri hem geri yönde düşük hızlı hareketi mümkün kılarak, tekrar eden ileri-geri manevralar sırasında yön değişiminin yumuşak olmasını sağlar.



Şekil 3. Çift Modlu İletim

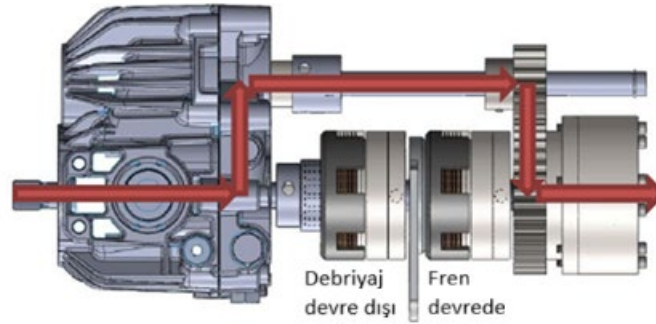
3.1. Transmisyon Çalışması

Kavrama devrede ve fren serbest olduğunda, güneş dişli motor tarafından tahrik edilir ve transmisyon hidro-mekanik modda çalışır. Pompa maksimum negatif deplasmandayken sistem dişli nötr (geared neutral) konumundadır. Pompa deplasmanı sıfıra, ardından maksimum pozitif deplasmana doğru değiştirildikçe, motor çıkışı ve halka dişli hızı tam negatiften sıfıra, ardından tam pozitive geçer. Bu sayede planet taşıyıcının ve transmisyon çıkış hızının kontrolü sağlanır.



Şekil 4. Hidromekanik mod güç akışı

Kavrama devre dışı bırakılıp fren uygulandığında, güneş dişli sabitlenmiş olur ve tüm güç hidrostatik üniteden geçer; bu, transmisyonun hidrostatik modda çalıştığı durumu ifade eder. Bu mod, son kademe redüksiyona bağlanmış klasik bir HST sistemi gibi davranır; pompa deplasmanının sıfır olduğu noktada çıkış hızı da sıfır olur. Bu durumda ileri ve geri yön hız aralıkları simetrik.



Şekil 5. Hidrostatik mod güç akışı

Kavrama devre dışı, fren serbest ve pompa sıfır deplasmanda olduğunda, motor esasen transmisyon çıkışından ayrılmış olur. Pompa sıfırdan farklı bir deplasmanda olsa ve halka dişliyi tahrik ediyor olsa dahi, güneş dişli serbestçe dönebildiği için planet taşıyıcı sabit kalabilir. Bu sabitleme, aracın kütlesi ve/veya park freni sayesinde sağlanır.

3.2 Kontrol Sistemi

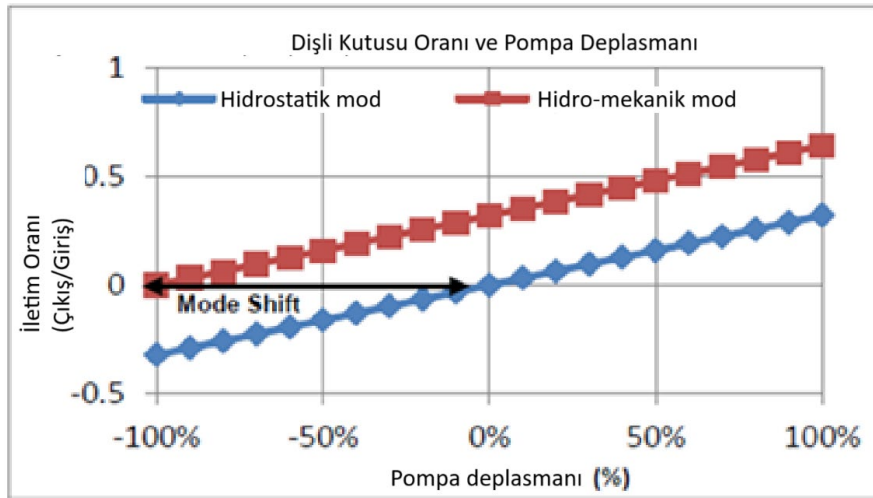
Çift modlu çalışmayı mümkün kılmak için, hidrostatik ve hidro-mekanik modlar arasında yumuşak geçiş sağlayabilen bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Çünkü sıfır çıkış hızı, her iki modda farklı pompa deplasmanlarında elde edilir. Bu nedenle, modlar arasında geçiş yapmadan önce transmisyonun devreden çıkarılması gerekir.



Modlar arasında geçiş için, önce transmisyon çıkış hızı sıfıra getirilir, ardından kavrama ve fren aynı anda devre dışı bırakılır. Pompa deplasmanı istenen mod için sıfır çıkış hızına karşılık gelecek şekilde ayarlanır ve ardından istenen moda bağlı olarak kavrama veya fren devreye alınır.

İstenilen transmisyon kontrolünü sağlamak için kavrama ve fren, elektronik kontrollü hidrolik sistem aracılığıyla çalıştırılır. Hidrolik basınç, elektro-oransal basınç düşürücü / tahliye valfleri tarafından kontrol edilir [7]. Hidrostatik transmisyondaki pompa, doğrudan deplasman kontrollü (DDC) tiptedir; yani eğik disk (swashplate) açısı harici bir bağlantı mekanizmasıyla doğrudan kontrol edilir.

Elektronik kontrol imkânı sağlamak için, eğik diskin mafsal (trunnion) koluna bağlı bir kol mekanizmasına lineer elektrikli aktüatör bağlanmıştır. Vites geçiş sıralamaları, hız kontrolü ve emniyet özellikleri ise, durum mantığına (state logic) göre programlanmış bir elektronik mikrodenetleyici [8] tarafından yönetilir.

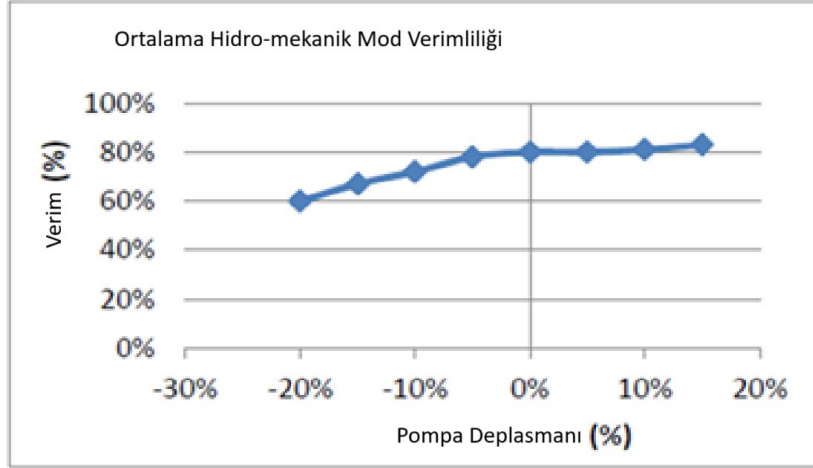


Şekil 6. Her iki çalışma modu için pompa deplasmanının bir fonksiyonu olarak iletim oranı (Çıkış hızı/Giriş hızı).

TRANSMİSYON PERFORMANSI

Literatürde yer alan bazı çalışmalarda, U-şekilli hidrostatik transmisyon ünitesine entegre edilmiş çift modlu (HST/HMT) transmisyon sistemlerinin performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu çalışmalarda, tipik olarak 7,5 kW gücünde bir elektrik motoru ile tahrik edilen test düzeneklerinde, sistemin giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen tork sensörleri aracılığıyla verimlilik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, hidro-mekanik modda çalışan çift modlu transmisyonun, yalnızca hidrostatik ünitenin sağladığı maksimum %80 verimliliğe kıyasla yaklaşık %84 seviyelerine ulaşabildiği belirtilmiştir [2].

Ancak söz konusu çalışmaların çoğunda, test sistemlerinin güç sınırları ve kullanılan dinamometrelerin giriş hızı kısıtları nedeniyle, transmisyonun tasarımda öngörülen 25 kW'lık tam yük aralığının tamamı kapsamlı şekilde değerlendirilememiştir. Bununla birlikte, test edilen deplasman aralıklarının (örneğin pompa deplasmanı -%20 ila +%15) tarımsal uygulamalarda en sık karşılaşılan çalışma koşullarını temsil ettiği ifade edilmektedir [3], [4].



Şekil 7: Pompa deplasmanının bir fonksiyonu olarak iletim verimliliği

Saha uygulamalarıyla ilgili bulgularda ise, bu tür transmisyonların 20–30 kW güç aralığındaki kompakt traktörler üzerine uygulanarak, temel güç aktarım gereksinimlerini karşılayabildiği görülmektedir. Yine bazı kaynaklarda, sistemde kullanılan lineer elektrikli aktüatörlerin kontrol yanıt sürelerinin iyileştirilmesi gerektiğine dair değerlendirmelere de rastlanmaktadır [6], [8].

FAYDALARI VE UYGULAMA ALANLARI

Düşük güçlü çift modlu hidrostatik/hidro-mekanik transmisyon — ve genel olarak sürekli değişken transmisyonlar (IVT) — geleneksel mekanik transmisyonlara kıyasla birçok avantaj sunmaktadır. Sürekli değişken transmisyonlar, motor devrinin araç yer hızından bağımsız olarak kontrol edilmesine olanak tanır. Bu sayede motor, her güç ihtiyacı için en verimli çalışma noktasında çalıştırılabilir ve böylece genel makine verimliliği önemli ölçüde artırılır.

Makine verimliliği aynı zamanda operatörün görevine en uygun çalışma hızını seçebilmesine olanak tanıyan bu yapı sayesinde artar; bu durum sınırlı sayıda sabit vitese bağlı kalma zorunluluğunu ortadan kaldırır. Artan üretkenlik, son kullanıcı açısından zaman, iş gücü, yakıt ve bakım maliyetlerinde tasarruf anlamına gelir.

Çift modlu transmisyonun sağladığı avantajlardan fayda sağlayabilecek uygulama alanları arasında çeşitli tarım ve çim bakım ekipmanları yer almaktadır. Bunlar şunları içerir:

- Kompakt / alt-kompakt traktörler
- Ticari biçme makineleri
- Özel hasat makineleri
- Çeltik ekim / hasat makineleri
- Arazi kullanım amaçlı yardımcı araçlar (UTV'ler)
- 20–30 kW tahrik gücü gerektiren diğer birçok arazi aracı

GELECEK ÇALIŞMALAR

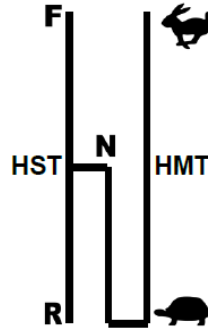
Genel Değerlendirme ve Geleceğe Yönelik Geliştirme Alanları

Yapılan çalışma, düşük güçlü tarım makineleri için çift modlu (hidrostatik + hidro-mekanik) transmisyolların pratikte uygulanabilirliğini ve verimlilik artışını göstermiştir. Ancak, sistemin ticarileştirilmesi ve daha geniş uygulama alanlarına yayılması için kontrol sisteminin sadeleştirilmesi, tepki sürelerinin iyileştirilmesi ve maliyet/karmaşıklık dengesinin sağlanması gerekmektedir.

İleriye dönük geliştirilebilecek başlıca alanlar:

- **Daha hızlı ve hassas kontrol** için yeni nesil elektro-hidrolik veya elektro-mekanik aktüatör çözümlerinin uygulanması,
- **Tam mekanik kontrol** opsiyonu ile düşük maliyetli pazarlara uyarlanabilirlik,
- **Kontrol algoritmalarının optimizasyonu** ile geçiş sürelerinin ve güvenliğinin artırılması,
- **Entegre kullanıcı arayüzleri** ile operatör etkileşiminin basitleştirilmesi,
- **Daha yüksek güçlü versiyonların geliştirilmesi** ile ürün ailesinin genişletilmesi.

Bu geliştirmeler tamamlandığında sistem, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan pazarlarda geniş bir uygulama yelpazesinde ekonomik ve teknik avantajlar sağlayabilecek hale gelecektir.



Şekil 8: Mekanik kontrol deseni

Transmisyolların tam çalışma aralığı boyunca performansını karakterize etmeye yönelik ilave çalışmalar da yürütülmektedir. Bu çalışmalar sayesinde transmisyolların tasarımı, motor ve araç hızlarına bağlı olarak en verimli aralıkta çalışacak şekilde optimize edilebilecektir.

SONUÇ

Düşük güçlü çift modlu hidrostatik/hidromekanik transmisyolların konsepti, hidro-mekanik güç bölmeli transmisyolların verimlilik ve esnekliğini, gelişmekte olan pazarlar ve daha küçük makinelerin ağırlıkta olduğu diğer sektörler için uygun maliyet ve boyutlarla sağlamaktadır. Artan verimlilik ve iş üretkenliği, son kullanıcıya daha yüksek çalışma hızları, daha düşük yakıt tüketimi ve genel olarak daha düşük işletme maliyetleri gibi önemli avantajlar sunmaktadır.

Yapılan testler, bu konseptin transmisyolların verimliliğini artırırken aynı zamanda sürekli değişken oranlı (CVT) bir çalışma imkânı sunduğunu göstermiştir. Devam eden çalışmalar, tasarımın daha da

iyileştirilmesini sağlayacak ve düşük güçlü arazi araçlarında yalnızca mekanik transmisyonlara uygun maliyetli bir alternatif oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Jacobson, E., Wright, J., Kohmäscher, T., *Hydro-Mechanical Power Split Transmissions (HMT) – Superior Technology to Solve the Conflict: Tier 4 vs. Machine Performance*, Proceedings of the 52nd National Conference on Fluid Power, National Fluid Power Association, 2011, pp. 125–134.
- [2] Danfoss Power Solutions, *LDU 20 Closed Circuit Axial Piston Transmission*, 2013, Document Number: L1124546.
- [3] Muehlbauer, J., Grogan, J., Rahman, M., *Comparison of CVT and IVT Systems for Off-Road Vehicle Applications*, SAE Technical Paper 2011-01-1323, 2011. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1323>
- [4] ISO 500:2014 – *Tractors and machinery for agriculture and forestry — Hydraulic power transmission — Performance testing*. International Organization for Standardization, 2014.
- [5] Borghi, M., Paltrinieri, S., Manzini, G., *Thermal analysis of hydrostatic transmissions for mobile applications*, Energy Conversion and Management, Volume 49, Issue 8, 2008, pp. 2320–2327. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.025>
- [6] Liu, Y., Virvalo, T., *Modeling and Simulation of Hydrostatic Transmission System with Fuzzy Logic Controlled Pump*, Proceedings of the 7th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Linköping University, 2001.
- [7] Sauer-Danfoss, *Design Guidelines for Closed Circuit Axial Piston Pumps*, Application Note AN113993, Revision C, 2012.
- [8] *Kontrol Sistemlerine Giriş*, Nobel Yayıncılık, Ankara, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

Mert EKİMCİ

1993 yılında İstanbul'da doğmuştur. İlk ve ortaöğrenimini İstanbul'da tamamladıktan sonra, 2019 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Mezuniyetinin ardından hidrolik-pnömatik sektöründe çalışmaya başlamış, 2023 yılından itibaren MERT TEKNİK A.Ş.'de Proje ve Satış Mühendisi olarak görev yapmaktadır.