

PRATİK YÜK ALGILAMA SİSTEMLERİNİN KONTROL VE KARARLILIK ANALİZİ

Arif KALYONCU

ÖZET

Yük algılama sistemleri, hidrolik güç endüstrisinde yaygın olarak kullanılır ve kontrol açısından basitliği nedeniyle tercih edilir. Hidrolik yük algılama sistemleri, özellikle ekskavatörler ve diğer mobil hidrolik makinelerde kullanılan, pompanın debisini ve basıncını yük ihtiyacına göre ayarlayan enerji verimli kontrol sistemleridir. Bu sistemler hem hassas kontrol sağlar hem de gereksiz enerji tüketimini önleyerek sistem verimliliğini artırır. Yük algılama prensibi, operatör tarafından kontrol edilen valf çıkışındaki yük basıncının algılanması ve pompa çıkış basıncının buna göre ayarlanması esasına dayanır. Böylece, hidrolik devrede yalnızca gerekli olan akış sağlanarak aşırı basınç kayıpları ve ısı oluşumu minimize edilir.

Bununla birlikte, yük algılama sistemleri dinamik ve doğrusal olmayan yapıları nedeniyle kararsızlığa yatkın olabilir. Sistemde motor hızı, hidrolik pompa karakteristikleri, valf dinamikleri, değişken yükler ve operatör girişleri gibi birçok dinamik ve doğrusal olmayan parametre bulunmaktadır. Özellikle operatör davranışlarındaki belirsizlik ve ani yük değişimleri, sistemin dengesini olumsuz etkileyebilir. Mevcut araştırmalar, bu sistemlerin stabilitesini farklı yöntemlerle ele almış olsa da çoğu çalışma pratik unsurları, özellikle yük algılama kontrol sürgülerin etkili açıklık alanının sistem dinamikleri üzerindeki etkisini göz ardı etmiştir.

Bu çalışmada, sistemin analizini basitleştirmek ve daha iyi anlamak için iki temel kontrol unsuru ele alınmıştır. Operatör girişi ve yük algılama sürgüsünün etkili açıklık alanı. Yük algılama sisteminin modellenmesi için basınç kontrol, yük algılama sürgüleri, servo ve dengeleme pistonu ile salınım plakası (eğim plakası) kiti içeren tipik bir sistem dikkate alınmıştır. Burada, operatör tarafından doğrudan kontrol edilen valf yerine, operatör girişine bağlı değişken alanlı bir kısma (orifis) kullanılmıştır. Ayrıca, değişken yüke sahip tek etkili bir hidrolik aktüatör modellenerek, geliştirilen kontrol yönteminin etkinliğine de değinilmiştir. Çalışmada, doğrusal olmayan sistem dinamikleri göz önünde bulundurularak, kontrol algoritmasının sistem kararlılığı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yük algılamalı hidrolik sistemler, Enerji Verimliliği, Mobil Hidrolik.

ABSTRACT

Load Sensing (LS) systems are widely used in the hydraulic power industry due to their simple control structure and high energy efficiency. These systems, particularly preferred in excavators and other mobile hydraulic machinery, adjust the pump's flow rate and pressure based on the load demand. By doing so, they provide precise control while minimizing unnecessary energy consumption, thus enhancing overall system efficiency. The fundamental principle of LS systems is based on sensing the load pressure at the valve outlet—controlled by the operator—and adjusting the pump pressure accordingly. In this way, only the required flow is delivered in the hydraulic circuit, minimizing excess pressure losses and heat generation.

However, LS systems inherently exhibit nonlinear and dynamic characteristics. Various parameters such as pump and valve dynamics, motor speed, variable load conditions, and operator inputs significantly influence the system's stability. In particular, uncertainty in operator behavior and sudden load changes can negatively affect the dynamic response of the system and lead to instability. While numerous studies in the literature have examined the stability of such systems using different approaches, most have overlooked the influence of practical factors—especially the effect of the effective orifice area of the load sensing control spool on system dynamics.

In this study, two fundamental control parameters are considered to simplify the analysis and better understand the behavior of LS systems: (1) operator input and (2) the effective orifice area of the load sensing control spool. A typical LS hydraulic system configuration has been modeled, which includes components such as a control piston (PC), load sensing spool (LS), servo unit, bias piston, and a swash plate assembly. Instead of a traditional valve, a variable-area orifice controlled by the operator input has been used in the model. In addition, a single-acting hydraulic actuator with a variable load has been modeled to evaluate the effectiveness of the proposed control approach.

During the modeling process, the nonlinear dynamics of the system are taken into account, and the impact of the proposed control algorithm on system stability is thoroughly analyzed. The results show that both the effective orifice area of the LS spool and operator input behavior play a critical role in determining the dynamic response and stability of the system.

Key Words: Load Sensing Hydraulic Systems, Energy Efficiency, Mobile Hydraulics

1. GİRİŞ

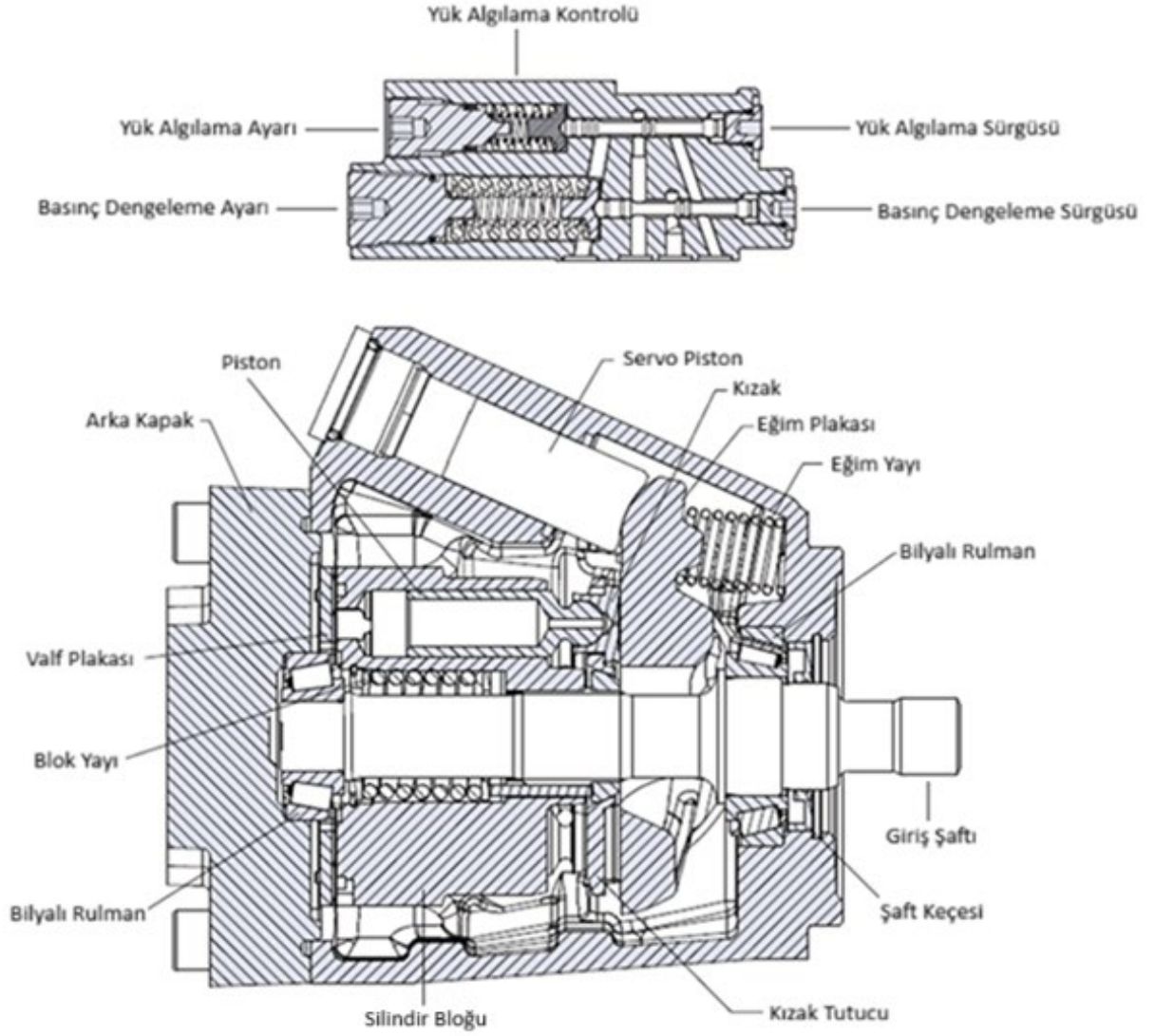
Yük algılamalı sistemler, modern hidrolik güç iletim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir. Bu sistemlerin hidrolik sektöründe bu kadar yaygınlaşmasının başlıca nedenlerinden biri, sağladıkları kontrol kolaylığı ve enerji verimliliğidir. Yük algılamalı sistemler, hidrolik devredeki yük ihtiyacına göre debiyi ve basıncı dinamik olarak ayarlayarak, sadece ihtiyaç duyulan gücü üretir. Bu sayede, enerji kayıpları azaltılır ve sistem daha etkin çalışır.

Yük algılamalı bir sistemde, yük algılama kontrolü basınç dengeleme kontrolü ile kullanıldığında sistemin pasif karakteri daha belirgin hale gelir. Pasif sistem kavramı, sistemin dış müdahale olmadan dengede kalabilme yeteneğini ifade eder. Bu durum, matematiksel modeller aracılığıyla teorik olarak gösterilebilir; yani sistemin dinamikleri belirli varsayımlar altında denge koşullarına göre analiz edilebilir.

Ancak, teorik analizlerden elde edilen sonuçlarla gerçek uygulamalar arasında bazı farklar ortaya çıkabilmektedir. Bu farkların en önemli sebeplerinden biri, sistemin fiziksel bileşenlerine ait bazı parametrelerin doğru şekilde seçilmemesidir. Özellikle sürgü boşlukları, sürgü'nün akış alan profili, yay sertlikleri ve mekanik sürtünmeler gibi parametreler sistemin kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu tür parametreler, sistemin tepkisini belirleyen temel unsurlardır ve çoğunlukla teorik olarak değil, deneme-yanılma yöntemiyle belirlenir.

Araştırmacılar pompanın kararlılığı ile operatör girişleri (örneğin kontrol kolu hareketleri) ve Yük Algılama sürgü alan profili arasında doğrudan bir ilişki kurmayı hedeflemektedir. Amaç, bu parametreler arasındaki etkileşimi açıklayarak sistemin tasarım sürecine katkı sağlamaktır.

Tipik bir yük algılamalı pompa tasarımı sunulmuştur [Şekil 1]. Bu çalışmada analiz edilen sistem, doğrusal olmayan bir modele dayanmaktadır ve modelde kontrol pistonu, kontrol yayı, servo piston ve eğik plaka gibi temel bileşenler yer almaktadır. Bu parçaların birlikte çalışmasıyla pompanın debi ve basınç üretimi gerçekleştirilir. Modeldeki bu elemanların dinamik davranışı, sistem kararlılığı açısından oldukça önemlidir.



Şekil 1. Tipik yük algılamalı pompa elemanları [1].

1.1. Yük Algılama Pompa Elemanları:

1. Servo piston (Eğim plakası)
2. Load Sense Yön Kontrol sürgüsü
3. Basınç dengeleme sürgüsü
4. Servo Piston
5. Bias Piston
6. Eğim plakası
7. Yay Mekanizmaları
8. Orifisler

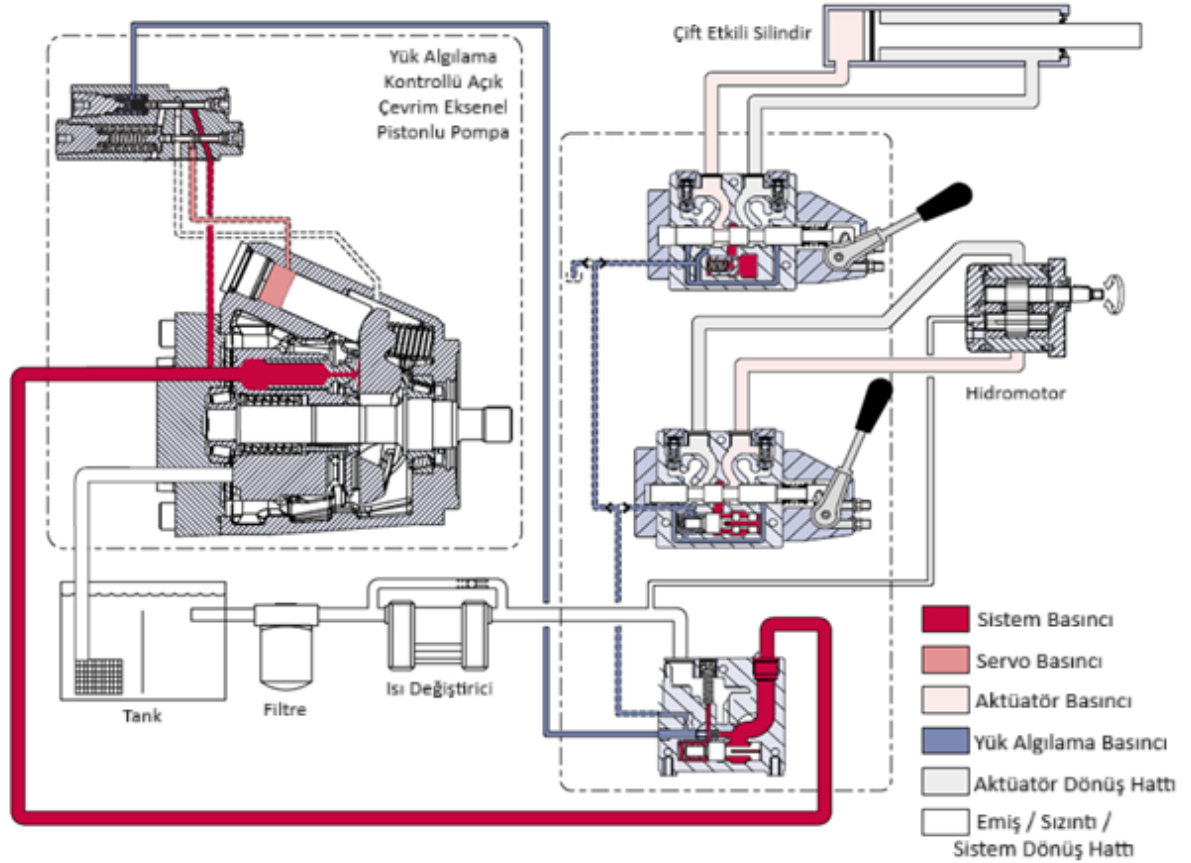
1.2. Yük Algılama Sistemin Çalışma Prensibi

Yük algılamalı hidrolik sistemler, mobil ve endüstriyel uygulamalarda enerji verimliliğini artırmak, sistem bileşenlerinin ömrünü uzatmak ve daha hassas bir kontrol sağlamak amacıyla geliştirilmiş modern hidrolik kontrol sistemleridir. Yük algılamalı sistemleri, klasik sabit debili sistemlerin aksine, hidrolik pompanın yalnızca sistemin ihtiyaç duyduğu debi ve basıncı üretmesini sağlayacak şekilde çalışır.

Yük algılamalı sistemlerinde yük değişimleri anlık olarak algılanır ve pompa bu değişikliklere hızlı bir şekilde tepki verir. Böylece:

- Operatör bir kolu hareket ettirdiğinde, sistem sadece o fonksiyonun ihtiyacı kadar debi sağlar.
- Aynı anda birden fazla fonksiyon çalışıyorsa, sistem en yüksek yükü referans alarak tüm valflerde dengeli bir hareket sağlar.

Bu sayede, özellikle çok fonksiyonlu mobil makinelerde (örneğin ekskavator, telehandler, vinç) koordineli ve düzgün hareketler mümkün olur.



Şekil 2. Yük algılamalı pompa çalışma diyagramı [1].

1.3. Yük Algılamalı Pompa Avantajları

Enerji Verimliliği: Pompa, sadece ihtiyaç duyulan akışı üretir; bu da motor gücünün boşa harcanmasını önler.

Isı Azalması: Daha az enerji tüketimi daha az ısı açığa çıkarır.

Hassasiyet: Operatör kontrolü çok daha hassas ve hızlıdır.

Uzun Ömür: Sistem bileşenleri daha az zorlandığı için ömürleri uzar.

Azalan Gürültü: Pompanın sürekli tam debide çalışmaması, gürültü seviyelerini düşürür.

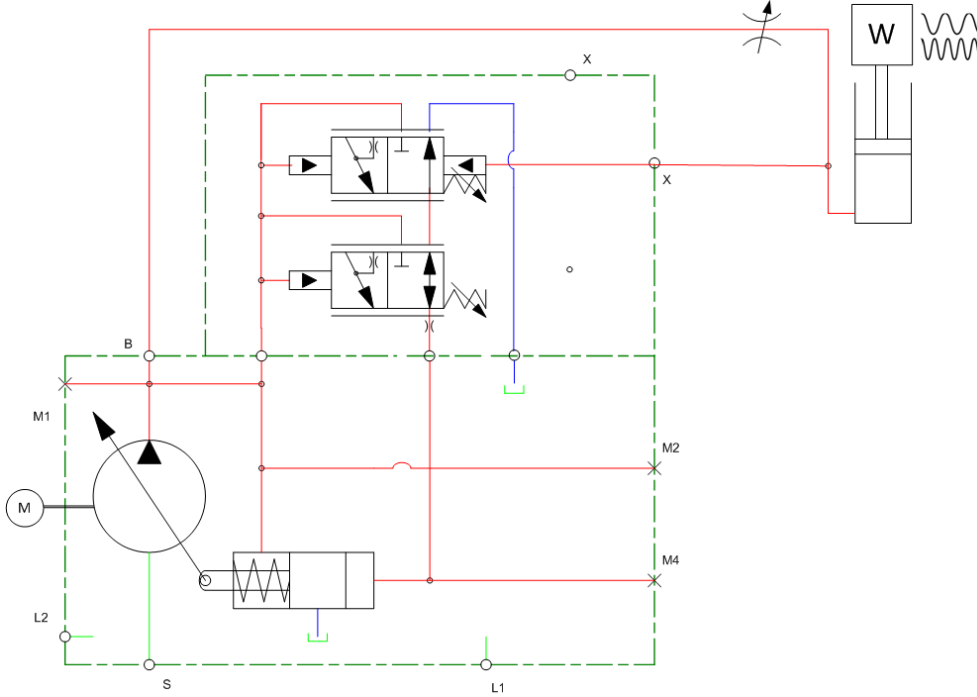
1.4. Yük Algılamalı Pompa Dezavantajları

Yük algılama hattının gecikmesi, kontrol valfi ile pompa arasında basınç senkronizasyonunu geciktirebilir.

Karmaşık devre yapısı nedeniyle başlangıç maliyeti geleneksel sistemlere göre daha yüksektir.

Sistem doğru projelendirilmediğinde, yük paylaşımı sorunları yaşanabilir.

1.5. Yük Algılamalı Pompa Devre Şeması



Şekil 3. Yük algılamalı pompa devre şeması [2].

1.6. Daraltma Orifis - Kazanç orifis

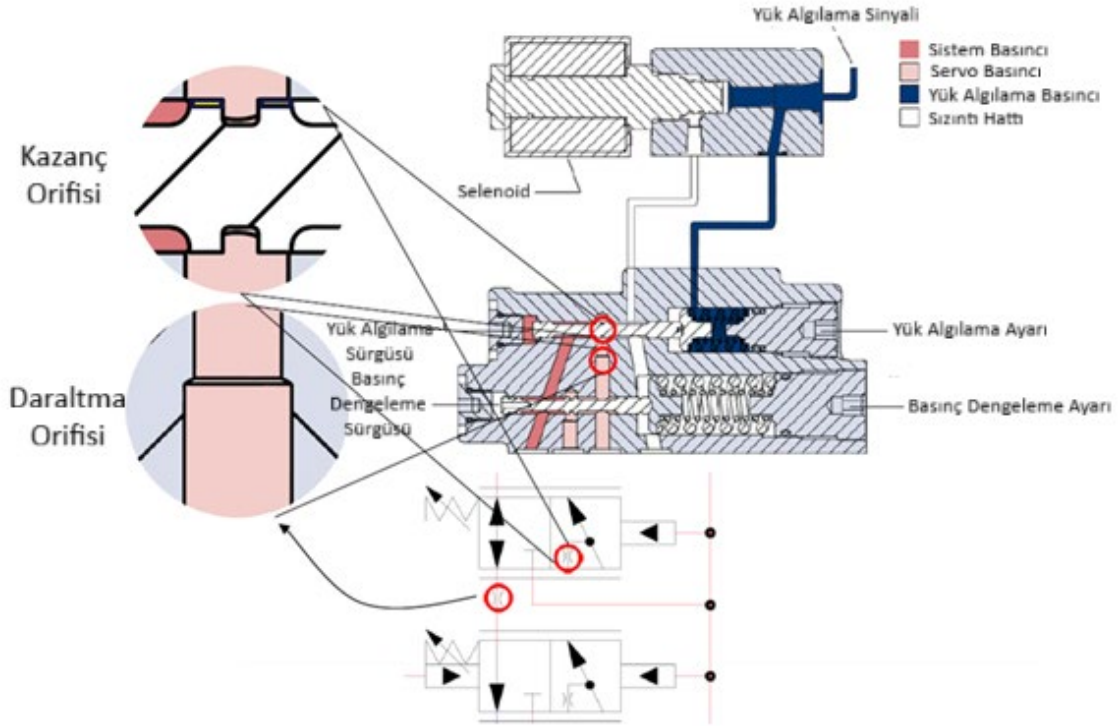
Kazanç orifis ve Daraltma orifis, yük algılamalı hidrolik sistemlerde sinyal geçişlerini kontrol eden ve sistemin kararlılığına doğrudan etki eden iki önemli akış bileşenidir. Bu iki orifis genellikle yük algılama hattında bulunur ve sistemin dinamik tepkisini şekillendirir. İşlevleri şu şekilde özetlenebilir.

Kazanç orifis:

Yük basıncı sinyalinin yük algılama sürgüsüne iletim hızını artırmak için kullanılır. Bu sayede, yük algılama hattının duyarlılığını artırır, yani yük değişimlerine daha hızlı tepki verilmesini sağlar. Ancak gain orifisin gereğinden büyük olması sistemde kararsızlık ve salınıma sebep olabilir.

Daraltma orifis:

Yük algılama hattındaki sinyal geçişini sınırlamak ve yavaşlatmak için kullanılır. Aynı zamanda ani basınç değişimlerinin filtrelenmesini sağlar. Sistemin kararlılığını daha yumuşak hale getirmeyi amaçlar. Gereğinden fazla dar seçilen bir Daraltma orifis sistemin gecikmeli tepki vermesine sebep olabilir.



Şekil 4. Gain orifis ve Choke orifis görselleri [2].

Bu iki orifis birlikte kullanılması durumunda sistemin zaman sabiti, frekans cevabı ve stabil çalışma sınırları optimize edilir. Özellikle de değişken yüklerde salınımların genliği bu orifisin doğru seçimiyle azaltılabilir.

2. YÜK ALGILAMALI SİSTEMLERDE KARARSIZLIK SEBEPLERİ

1. Motor hızı dalgalanmaları
2. Operatör davranışındaki belirsizlik
3. Değişken yük profilleri
4. Valf dinamikleri ve doğrusal olmayanlar
5. Sürgü geometrisinin etkisi (özellikleri LS sürgü açıklık alanı)

2.1. Motor Hızı Dalgalanmaları

Yük algılama sistemlerinin en önemli enerji kaynağı olan içten yanmalı motorlar veya elektrikli sürücüler, özellikle yük altında devir dalgalanması gösterebilir. Pompa çıkış debisi motor hızıyla doğrudan ilişkili olduğundan, devirdeki ani değişiklikler doğrudan sistem basıncına ve aktüatör (silindir & hidromotor) tepkisine yansır. Bu durum, özellikle düşük yükte aşırı hassas sistemlerde basınç salınımları (limit çevrimler) oluşturabilir. Sistem tasarımı sırasında sabit motor devri varsayımı yapılması, bu etkilerin göz ardı edilmesine neden olabilir. Motor hızındaki dalgalanmalar sisteme giden yağ miktarıyla da doğrudan alakalı olması sebebiyle sistemin çevrim süresini de etkileyebilir.

2.2. Operatör Davranışındaki Belirsizlik

Yük algılamalı hidrolik sistemler, genellikle manuel valf kumandaları (örneğin kontrol kumandaları, pedallar) aracılığıyla operatör tarafından kontrol edilir. Operatör girişleri, sistem için harici bir kontrol girdisi oluşturur ve özellikle mobil uygulamalarda (ekskavatör, yükleyici, vinç) sistem davranışının belirleyici unsurlarından biridir. Ancak bu insan kaynaklı girişler, doğaları gereği belirsiz, kesintili ve ani değişimlere açık niteliktedir.

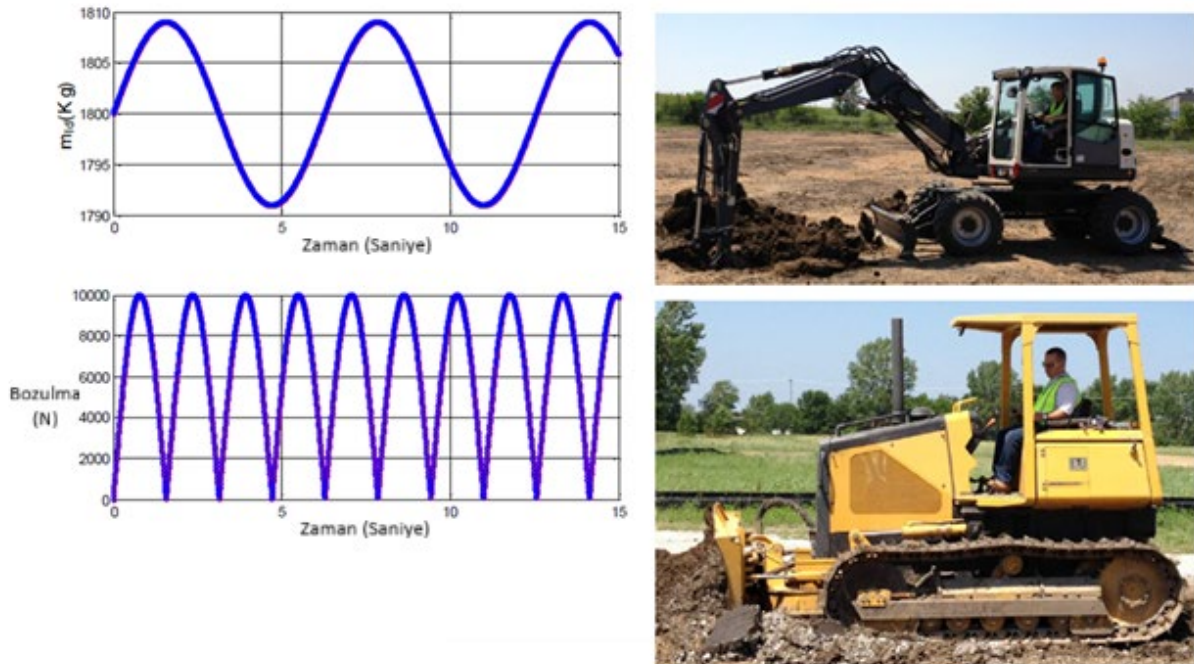
Operatörün kullandığı joystick veya valf kolu üzerinden gelen girişler çoğunlukla aşağıdaki niteliklere sahiptir:

- Ani geçişler (step input): Joystick'in hızla tam açık veya tam kapalı konuma getirilmesi.
- Sürekli salınımlı hareketler: İnce ayar yapılamayan operatörlerde istemsiz küçük hareketler.
- Kullanıcı alışkanlıkları: Farklı operatörlerin aynı makinede farklı tepkiler oluşturması.
- Tepki süresi farklılıkları: Tecrübesiz operatörlerin geç müdahaleleri ya da aşırı hassas tepkileri.

Bu tür girişler, sistemin dinamik dengesini etkileyerek kontrol algoritmasının kararlılığını bozabilir. Özellikle valf açıklık alanı, operatör komutuna doğrudan bağlı olduğunda, açıklıktaki ani değişimler pompa çıkışında dalgalanmalara yol açar

2.3. Değişken Yük Profilleri

Hidrolik makinelerde yük koşulları sabit değildir. Örneğin bir ekskavatörde kepçe boşken sistemin dinamiği farklı, doluyken farklıdır. Bu tür yük geçişleri (örneğin yük artışı, yük serbest bırakma, yük kaçması) pompa çıkışında ani basınç boşalmalarına veya yük binmelerine neden olabilir. Özellikle geri kaçan yükler, valf akışına rağmen silindirin hızlanmasına neden olarak kavitasyon riski ve kontrol kaybı yaratabilir.



Şekil 5. Kütle değişimi ve yük bozulması grafiği [2].

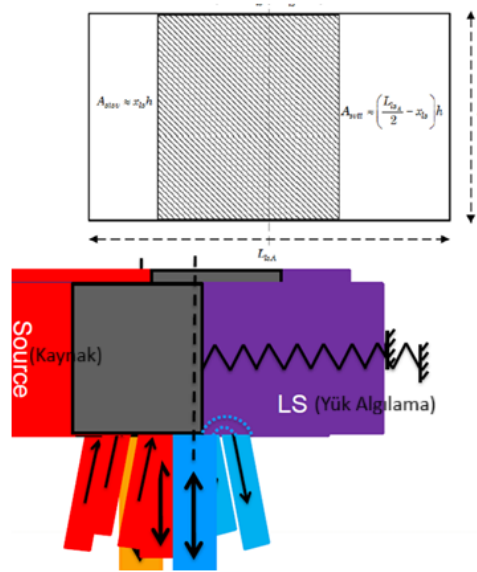
2.4. Valf Dinamikleri

Valfler çoğunlukla lineer olmayan akış-hareket karakteristiğine sahiptir. Açıklık ile akış arasında tam doğrusal olmayan karekök ($\sqrt{\Delta P}$) bağıntısı bulunur. Bu durum, küçük açıklık değişimlerinin büyük debi değişimlerine neden olmasına yol açabilir. Ayrıca valf sürgüsünün mekanik hareketinde gecikmeler, histerezis ve dinamik sürtünmeler gibi etkiler vardır. Bu tür valf histerezisi ve gecikmesi, sistem cevabını yavaşlatabilir ya da salınıma neden olabilir.

2.5. Sürgü Geometrisinin Etkisi (Özellikle Yük Algılama Sürgü Açıklık Alanı)

Yük algılamalı sistemlerde kararlılık üzerinde en çok göz ardı edilen fakat en etkili parametrelerden biri, Yük algılama sürgüsü açıklık alanı ve bu alandaki değişim karakteristiğidir. Yük algılama sürgü açıklığı, servo pistonuna gönderilen akış miktarını belirler ve böylece eğim plakasının açısını, dolayısıyla pompa debisini etkiler. Yük algılama sürgü açıklık eğrisi düzgün değilse veya geçiş alanları çok keskinse, servo kontrolü ani tepkiler verir ve sistem aşırı hassas veya yavaş hale gelebilir.

Bu çalışmada, bu nedenle sürgü açıklık alanı bir kontrol girdisi olarak değerlendirilmiştir. Böylece sürgü geometrisi, sistem kararlılığı açısından aktif bir tasarım parametresi haline getirilmiştir. Geri adımlama temelli kontrol yaklaşımı sayesinde, belirli yük profilleri altında ideal sürgü açıklığı teorik olarak belirlenebilmiştir.



Şekil 6. Yük algılama sürgü geçiş aralığı [2].

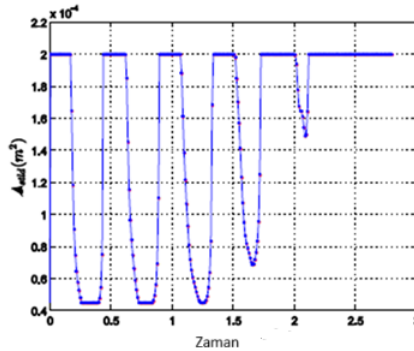
3. YÜK ALGILAMA SİSTEMLERDE GERİ ADIM KONTROL TASARIMI

Bu bölüm, hidrolik yük algılamalı sistemlerde kararlılığı sağlamak amacıyla geliştirilen geri adımlı (geri adım) kontrol metodolojisinin iki temel alt sistem (Subsystem I ve II) üzerinde uygulanmasını ele alır. Tüm kontrol tasarımı, karmaşık, doğrusal olmayan dinamiklerin Lyapunov kararlılık ilkeleriyle analizine dayalıdır. Yük algılamalı pompalar için yapılan simülasyonlarda girdiler genelde sabit kabul edilir ve doğrusal dinamikler eşliğinde analizler yapılır.

3.1. Subsystem I için Geri Adım Kontrolü

Subsystem I, silindir (aktüatör) yük dinamiklerini ve kaynak basıncını içerir. Bu bölümde amaç, silindir hızını kontrol altına alacak bir valf orifis alanı belirlemektir.

- Hedef: Silindir hızının istenen bir yörüngeyi takip etmesini sağlamak → bu sayede sistemde boşluk oluşumu(kavitasyon) gibi istenmeyen etkiler engellenir.
- Yöntem: Lyapunov fonksiyonu tanımlanarak, sistemin hata değişkeni üzerinden stabilite analizi yapılır.
- Sonuç: Geri adımlı denetim sayesinde, operatör komutu (valf açma alanı) dinamik olarak tanımlanır ve sistem, dalgalanan yük altında dahi stabil kalır.



Şekil 7. Operatör komutuna karşılık gelen valf açıklığı tablosu [2].

Dinamik yük altında geri adım kontrol algoritmasının nasıl çalıştığını açıkça ortaya koymaktadır. Operatör girdisi gibi görünen valf orifis alanı aslında kontrol sisteminin hesapladığı optimum değeri temsil eder ve sistem kararlılığını sağlamak için sürekli uyum sağlar. Grafik, algoritmanın hem esnek hem de reaktif (reaksiyonel) olduğunu göstermektedir.

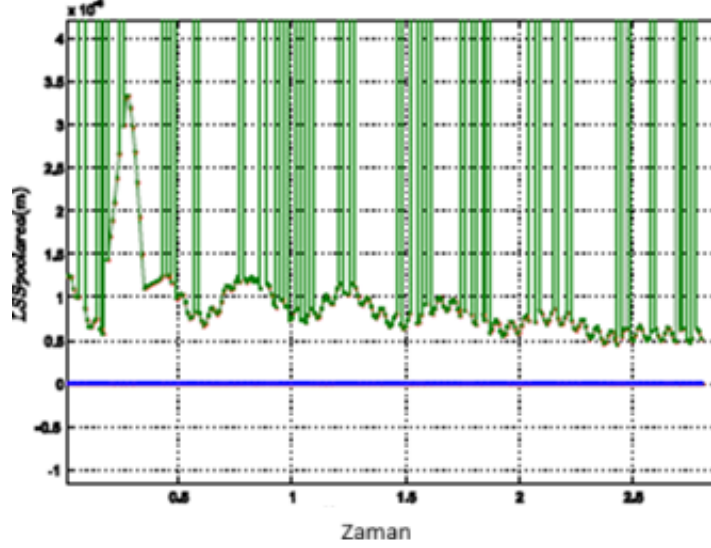
3.2. Subsystem II için Geri Adım Kontrolü

Subsystem II, swash plate (eğimli disk) ve servo piston dinamiklerini içerir. Bu bölümde ise yük algılama sürgü alanının (yük algılama pistonu açıklığı) nasıl ayarlanması gerektiği analiz edilir.

- Hedef: Eğim plakası açısını (ve hızını) yönlendirmek için Yük algılama sürgü açıklığının yükseklik değerini hesaplamaktır.
- Yöntem: Yine Lyapunov fonksiyonlarıyla kontrol yasası türetilir. Sistem içi etkileşimler (servo

basıncı, momentler, piston konumu vb.) göz önüne alınarak bir fonksiyon elde edilir.

- Sonuç: Belirli bir eğim hareket profiline göre yük algılama sürgü açıklığı belirlenerek tüm sistemde kararlılık sağlanır.



Şekil 8. LS sürgü alanının zamana göre değişimi [2].

Yük altındaki değişkenlere karşı sistemin kararlı kalması için yük algılama sürgü açıklığının nasıl şekillendiğini göstermektedir. Bu açıklık, pompanın tepkisini yöneten servo sistemin kontrolünde kritik rol oynar. Grafik, geri adımlı kontrol algoritmasının yük algılama sürgü açıklığını zamana ve yüke duyarlı şekilde nasıl dinamik olarak belirlediğini ve böylece tüm sistemin dengesini sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, yük algılamalı bir pompa sisteminin kararlılık analizi ele alınmıştır. Doğrusal olmayan bir pompa modeli üzerinde geri adımlama (geri adım) yönteminin uygulanmasıyla, salınımlı yük koşulları altında pompa kararlılığı incelenmiştir. Bu süreçte, valf açıklık alanı ve LS sürgü açıklık alanı dış kontrol girdileri olarak değerlendirilmiştir. Valf açıklığı gerçek bir dış giriş olarak modellenirken, yük algılama sürgü açıklık alanı sistem içi bir değişken olmasına rağmen, bu çalışmada salınımlı yük durumlarına karşı sistemin tepkisini düzenleyebilmek amacıyla sürgü açıklık profili elde edilmeye çalışılmıştır. Bu profil, özellikle kazanç ve daraltma orifislerinin boyutlarının belirlenmesi açısından yol gösterici olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] .Das, A., & Bretey, E. (2014, March). Control and Stability Analysis of Practical Load-Sense Systems. Danfoss Power Solutions. IFPE 2014 Conference, Las Vegas, NV, USA. [Bildiri ve sunum dosyasına dayanmaktadır]

[2].Danfoss Power Solutions. (2016). 45 Frame Variable Displacement Pump: Technical Information Manual. Danfoss. [Teknik veri sayfası]

ÖZGEÇMİŞ

Arif KALYONCU

1998, İstanbul doğumludur. 2021 yılında Kastamonu Üniversitesi Makina Mühendisliği programından mezun olmuştur. 2019 yılında Mert Teknik Fabrika Malzemeleri Tic. ve San. A.Ş. Firmasında 1 ay staj yapmıştır. Pandemi döneminde 1,5 yıl kadar Mert Teknik Fabrika Malzemeleri Tic. ve San. A.Ş. bünyesinde tekniker olarak çalışmıştır. Kasım 2021 'den beri Mert Teknik Fabrika Malzemeleri Tic. ve San. A.Ş. 'de Proje ve Satış mühendisi olarak görevini devam ettirmektedir.