



# **Optimal ABS Frenleme Kontrolcüsünün Geliştirilmesi**

**Program Kodu: 3501**

**Proje No: 112E267**

Proje Yürütücüsü:  
**Yrd. Doç. Dr. Erkin DİNÇMEN**

Bursiyer:  
Tunç ALTINEL

MART 2015  
İSTANBUL



## Önsöz

Bu projede, yol koşulları bilgisine ihtiyaç duymadan optimum frenleme performansını sağlayacak bir ABS kontrol algoritması geliştirilmiş ve bu algoritma deneysel bir sisteme uygulanmıştır. Geliştirilen algoritmanın temeli literatürde Ekstremum Arama Algoritması (EAA) (Extremum Seeking Algorithm) olarak adlandırılan yöntemdir. Bu algoritma, bir sistemin optimum çalışma noktasının önceden bilinmediği durumlarda kullanılabilir. Örneğin acil durum frenlemede ihtiyaç duyulduğu gibi bilinmeyen yol koşullarında tekerlek ile yol arasındaki frenleme kuvvetlerinin maksimize edilmesi problemi EAA'nın uygulama alanına girmektedir.

Proje ekibi olarak projeyi destekleyen Tübitak'a teşekkür ederiz.



## İçindekiler

|                                                                            |       |
|----------------------------------------------------------------------------|-------|
| Önsöz.....                                                                 | (i)   |
| Tablo Listesi.....                                                         | (iii) |
| Şekil Listesi.....                                                         | (iv)  |
| Özet.....                                                                  | (v)   |
| Abstract.....                                                              | (vi)  |
| 1. Giriş.....                                                              | (1)   |
| 2. Literatür Özeti.....                                                    | (6)   |
| 3. Gereç ve Yöntem.....                                                    | (8)   |
| 3.1 Algoritmanın Teorik Temellerinin Kurulması.....                        | (8)   |
| 3.2 Deneysel Çalışmalar için Gerekli Gözlemleyicilerin Geliştirilmesi..... | (16)  |
| 4. Bulgular.....                                                           | (21)  |
| 4.1 Simulasyon Çalışmaları.....                                            | (21)  |
| 4.2 Deneysel Çalışmalar.....                                               | (23)  |
| 5. Tartışma/Sonuç.....                                                     | (28)  |
| Kaynaklar.....                                                             | (30)  |



## **Tablo Listesi**

Tablo 1. Nüfus, sürücü belgesi, taşıt, kaza, ölü ve yaralı sayısı.....(1)

Tablo 2. Trafik kazasına neden olan sürücü, yolcu, yaya, yol ve taşıtın kusur oranı.....(1)

## Şekil Listesi

|                                                                                                                                                       |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Şekil 1. Eşik yöntemi ile çalışan ABS algoritması.....                                                                                                | (2)  |
| Şekil 2. Tekerlek modeli.....                                                                                                                         | (3)  |
| Şekil 3. Farklı yol koşullarında boylamsal tekerlek kuvveti karakteristiği.....                                                                       | (3)  |
| Şekil 4. $s$ ve $\dot{s}$ 'nın (5) denklemine göre değişimi ( $dF_x(\kappa)/d\kappa > \rho/M$ olduğu durum).....                                      | (10) |
| Şekil 5. $s$ ve $\dot{s}$ 'nın (5) denklemine göre değişimi ( $dF_x(\kappa)/d\kappa < -\rho/M$ olduğu durum).....                                     | (10) |
| Şekil 6. Amaç fonksiyonu.....                                                                                                                         | (11) |
| Şekil 7. $s$ ve $\dot{s}$ 'nın değişimi, (4) numaralı koşulun geçerli olmadığı ve $dF_x(\kappa)/d\kappa > 0$ olduğu durum için.....                   | (12) |
| Şekil 8. (3) denklemine göre $\kappa$ 'nın değişimi.....                                                                                              | (12) |
| Şekil 9. $s$ ve $\dot{s}$ 'nın değişimi, (4) numaralı koşulun geçerli olmadığı ve $dF_x(\kappa)/d\kappa < 0$ olduğu durum için.....                   | (12) |
| Şekil 10. $s$ değişkeninin zamanla değişimi.....                                                                                                      | (14) |
| Şekil 11. ABS için uyarlamalı ekstremum arama algoritması.....                                                                                        | (14) |
| Şekil 12. ABS Deney sistemi.....                                                                                                                      | (16) |
| Şekil 13. ABS deney sisteminin şematik diyagramı.....                                                                                                 | (17) |
| Şekil 14. ABS Deney sistemi kontrol yapısı.....                                                                                                       | (20) |
| Şekil 15. Frenleme sırasında araç ve tekerlek hızının değişimi.....                                                                                   | (21) |
| Şekil 16. Normalleştirilmiş boylamsal teker kuvvetlerinin zamanla değişimi (Islak asfalt yol, $\mu_{max} = 0.8$ ).....                                | (21) |
| Şekil 17. Normalleştirilmiş boylamsal teker kuvvetlerinin zamanla değişimi (Karlı yol, $\mu_{max}=0.4$ ).....                                         | (22) |
| Şekil 18. Islak yolda frenleme sırasındaki fren torklarının değişimi.....                                                                             | (22) |
| Şekil 19. Karlı yolda frenleme sırasındaki fren torklarının değişimi.....                                                                             | (23) |
| Şekil 20. ABS deney sisteminin simulasyon modelinden okunan değerler ile gözlemleyicinin verdiği değerlerin karşılaştırılması (Kuvvet değerleri)..... | (24) |
| Şekil 21. ABS deney sisteminin simulasyon modelinden okunan değerler ile gözlemleyicinin verdiği değerlerin karşılaştırılması (Moment değerleri)..... | (24) |
| Şekil 22. ABS Deney Sisteminde sürtünme fonksiyonu $\mu$ ile kayma oranı $\kappa$ 'nın değişimi....                                                   | (25) |
| Şekil 23. ABS deney sisteminden ölçülen tekerlek hızları değerleri.....                                                                               | (26) |
| Şekil 24. Frenleme deneyi sırasında kayma oranı değerinin değişimi.....                                                                               | (26) |
| Şekil 25. Frenleme deneyi sırasında fren motoru kontrol girişi $i$ nin değişimi.....                                                                  | (27) |

## Özet

Günümüzde taşıtlarda kullanılan ticari ABS sistemleri, frenleme sırasında tekerleklerin dönme hızlarını ölçmekte, tekerleklerin yavaşlama ivmesi belli bir kritik eşik değerini aştığında fren basıncına müdahale ederek tekerleklerin kilitleme tehlikesi olmadan yavaşlamalarını sağlamaktadır. Bu sistem, kilitlemeyi önlemekle birlikte tekerleklerin maksimum frenleme potansiyelini tam olarak ortaya çıkaramamaktadır. Frenleme performansını iyileştirecek çeşitli ABS algoritmaları akademik düzeyde geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu süreçteki en önemli zorluk, tekerleklerin farklı yol koşullarında farklı karakteristiklerde davranış göstermesidir. Maksimum frenleme performansını sağlayacak bir ABS algoritması yol koşullarını göz önüne almalı fakat yol koşullarının önceden ölçümü ya da kestiriminin zorluğu, bu amacın önünde bir engel olarak durmaktadır.

Bu projede, yol koşulları bilgisine ihtiyaç duymadan optimum frenleme performansını sağlayan bir ABS kontrol algoritması geliştirilmiş ve bu algoritma deneysel bir sisteme uygulanmıştır. Geliştirilen algoritmanın temeli literatürde Ekstremum Arama Algoritması (EAA) olarak adlandırılan yöntemdir. Bu algoritma, bir sistemin optimum çalışma noktasının önceden bilinmediği durumlarda kullanılabilir. Örneğin acil durum frenlemesinde ihtiyaç duyulduğu gibi bilinmeyen yol koşullarında tekerlek ile yol arasındaki frenleme kuvvetlerinin maksimize edilmesi problemi EAA'nın uygulama alanına girmektedir.

Projede EAA temelli bir ABS kontrol algoritması geliştirilmiştir. Literatüre getirilen bir yenilik olarak, arama algoritmasında kullanılan parametreler uyarlamalı hale getirilerek Uyarlamalı Ekstremum Arama Algoritması tabanlı ABS kontrolcüsü geliştirilmiştir. Bu şekilde algoritmanın hızlı bir şekilde optimum çalışma noktasını bulması, bulduktan sonra ise parametrelerin uyarlanarak optimum nokta etrafında düşük genlikli salınımlar ile frenleme performansının önemli ölçüde iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca literatürde önerilen ABS kontrol algoritmalarının hemen hemen hepsi sadece bilgisayarda gerçekleştirilen simülasyonlar ile doğrulanmakta, gerçek bir sistemde gerçek zamanlı uygulanabilirlikleri soru işareti olarak kalmaktadır. Bu projede bir ABS deney düzeneği satın alınmış ve algoritmanın gerçek zamanlı testleri gerçekleştirilmiştir.

## Anahtar Kelimeler:

ABS Frenleme Kontrolcüsü, Ekstremum Arama Algoritması, Kendi Kendine Optimizasyon



## **Abstract**

Commercial ABS systems used in vehicles today measure rotational speed of the wheels. When the wheel deceleration value exceeds a certain critical threshold, the ABS intervenes to the brake pressure to slow down the wheel without the danger of locking. While this system prevents locking of the wheels, it does not provide full braking potential of the tires. The most important challenge in this process is that the wheels show different characteristics in different road conditions. For maximum braking performance, an ABS algorithm must take into account current road conditions, but the difficulty of pre-measurement or estimation of road conditions stands as an obstacle on this goal.

In this project, an ABS control algorithm was developed and implemented in an experimental setup. The algorithm provides optimal braking performance without any road condition information. The basis of the algorithm is Extremum Seeking Algorithm (ESA). ESA can be used for the situations where the optimum operating point of a system is not known in advance. For example in emergency braking cases, the problem of maximizing the braking force between the wheel and the road in an unknown road condition is an example of the application area of the ESA.

In this project, an ESA-based ABS control algorithm was developed. As a novelty to the literature, by making the parameters of the search algorithm adaptive, an Adaptive Extremum Seeking Algorithm based ABS controller was proposed. In this way, the algorithm finds quickly the optimum operating point, and after finding it, by adapting the parameters, braking with low-amplitude oscillations around the optimum operating point is accomplished. In addition, an ABS experimental setup was purchased and real time tests of the algorithm were conducted in this setup.

## **Keywords:**

ABS Braking Controller, Extremum Seeking Algorithm, Self Optimization

## 1. GİRİŞ

Türkiye İstatistik Kurumu Trafik Kaza İstatistikleri Yıllığı 2010 verilerine göre Türkiye karayollarında meydana gelen 1106201 trafik kazasında 4045 kişi hayatını kaybetmiş, 211496 kişi yaralanmıştır. Tablo 1’de yıllara göre verilen kaza istatistiklerine bakıldığında trafik kazaları sonucu gerçekleşen ölüm ve yaralanmaların ve beraberinde gelen ekonomik kayıpların ülkenin en önemli sorunlarından biri olmaya devam ettiği görülmektedir. Tablo 2’de trafik kazalarına neden olan unsurların yüzde olarak katkıları görülmektedir. Örneğin 2010 yılında gerçekleşen kazalarda sürücülerin %89.72 oranında kusurlu olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan anlaşılmaktadır ki kazaların en önemli sebebi sürücü hatalarıdır.

Tablo 1. Nüfus, sürücü belgesi, taşıt, kaza, ölü ve yaralı sayısı (Kaynak: Türkiye İstatistik Kurumu Trafik Kaza İstatistikleri Yıllığı 2010).

| Yıllar | Nüfus (Bin) | Sürücü belgesi olan kişi sayısı | Motorlu Taşıt Sayısı | Toplam kaza | Ölümlü, yaralanmalı kaza | Ölü sayısı | Yaralı sayısı |
|--------|-------------|---------------------------------|----------------------|-------------|--------------------------|------------|---------------|
| 2001   | 68 529      | 14 491 332                      | 8 521 956            | 442 960     | 66 243                   | 4 386      | 116 203       |
| 2002   | 69 626      | 14 994 960                      | 8 655 170            | 439 777     | 65 748                   | 4 093      | 116 412       |
| 2003   | 70 231      | 15 488 493                      | 8 903 843            | 455 637     | 67 031                   | 3 946      | 118 214       |
| 2004   | 71 794      | 16 151 623                      | 10 236 357           | 537 352     | 77 008                   | 4 427      | 136 437       |
| 2005   | 72 065      | 16 958 895                      | 11 145 826           | 620 789     | 87 273                   | 4 505      | 154 086       |
| 2006   | 72 974      | 17 586 179                      | 12 227 393           | 728 755     | 96 128                   | 4 633      | 169 080       |
| 2007   | 70 586      | 18 422 958                      | 13 022 945           | 825 561     | 106 994                  | 5 007      | 189 057       |
| 2008   | 71 517      | 19 377 790                      | 13 765 395           | 950 120     | 104 212                  | 4 236      | 184 468       |
| 2009   | 72 561      | 20 460 739                      | 14 316 700           | 1 053 346   | 111 121                  | 4 324      | 201 380       |
| 2010   | 73 723      | 21 548 381                      | 15 095 603           | 1 106 201   | 116 804                  | 4 045      | 211 496       |

Tablo 2. Trafik kazasına neden olan sürücü, yolcu, yaya, yol ve taşıtın kusur oranı (Kaynak: Türkiye İstatistik Kurumu Trafik Kaza İstatistikleri Yıllığı 2010).

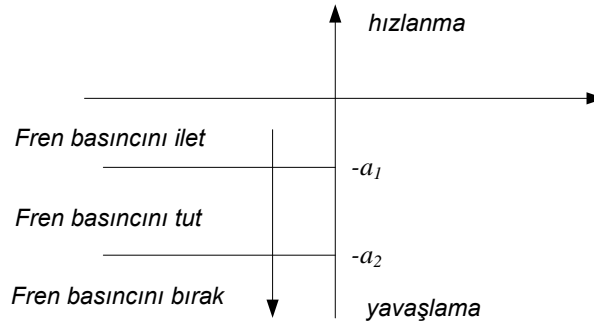
| Yıllar | Sürücü (%) | Yolcu (%) | Yaya (%) | Yol (%) | Taşıt (%) |
|--------|------------|-----------|----------|---------|-----------|
| 2001   | 96,56      | 0,31      | 2,32     | 0,43    | 0,38      |
| 2002   | 96,82      | 0,23      | 2,39     | 0,25    | 0,31      |
| 2003   | 97,03      | 0,16      | 2,32     | 0,22    | 0,27      |
| 2004   | 97,30      | 0,11      | 2,18     | 0,19    | 0,22      |
| 2005   | 97,39      | 0,11      | 2,04     | 0,22    | 0,25      |
| 2006   | 98,07      | 0,09      | 1,62     | 0,13    | 0,10      |
| 2007   | 98,03      | 0,09      | 1,64     | 0,11    | 0,14      |
| 2008   | 90,53      | 0,43      | 8,37     | 0,42    | 0,26      |
| 2009   | 89,60      | 0,41      | 9,09     | 0,61    | 0,29      |
| 2010   | 89,72      | 0,36      | 8,97     | 0,63    | 0,33      |



Yukarıda verilen istatistiklere göre kaza sayısını, dolayısıyla ölüm, yaralanma ve ekonomik kaybı azaltmak için atılması gereken adımların öncelikle sürücü hatalarını azaltmaya/gidermeye yönelik olması gerektiği açıktır. Bu amaçla, sürücülerin eğitimi ve geliştirilmesine yönelik adımlar atılması gerektiği gibi, aynı zamanda sürücülerin araçlarının hakimiyetini kaybetmelerini önleyecek araç içi aktif güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi de hayati önem arz etmektedir. ABS (Anti-Lock Braking System), ESP (Electronic Stability Program) gibi aktif güvenlik sistemlerinin amacı sürücülerin araçlarının hakimiyetini korumalarını sağlayarak olası kazaları engellemek ya da kazaların olası etkilerini minimize etmektir.

ABS fren sisteminin görevi temel olarak ani ve şiddetli frenleme sırasında tekerleklerin kilitlemesini engellemektir. Bunun iki önemli amacı vardır: Birincisi, tekerleklerin kilitlemesi durumunda tekerleklerin üretebileceği maksimum fren kuvvetinden daha az fren kuvveti oluşmakta, bu da aracın durma mesafesinin uzaması ile sonuçlanmaktadır. İkincisi, kilitlenen tekerlekler yanal yönde kuvvet oluşturamamakta, bu da aracın, sürücünün direksiyon girişine cevap vermemesi ile sonuçlanmaktadır. Tekerleklerin kilitlemesi engellenerek aracın durma mesafesi azaltılacağı gibi sürücünün direksiyon hakimiyetinin de korunması sağlanmış olur. Bu sebeplerden ötürü ABS, araçlarda kullanılan en hayati aktif güvenlik sistemlerindedir.

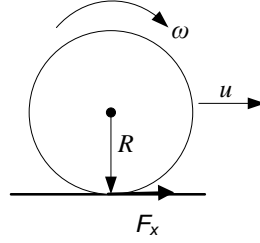
Günümüzde taşıtlarda kullanılan çoğu ticari ABS fren sistemi eşik yöntemi ile çalışmaktadır (Şekil 1). Bu yöntemde frenleme sırasında tekerleklerin yavaşlama ivmesi ölçülmekte, bu değer belli bir kritik eşik değerini aştığında fren basıncına müdahale edilerek tekerleklerin kilitlemeden yavaşlaması sağlanmaktadır.



Şekil 1. Eşik yöntemi ile çalışan ABS algoritması

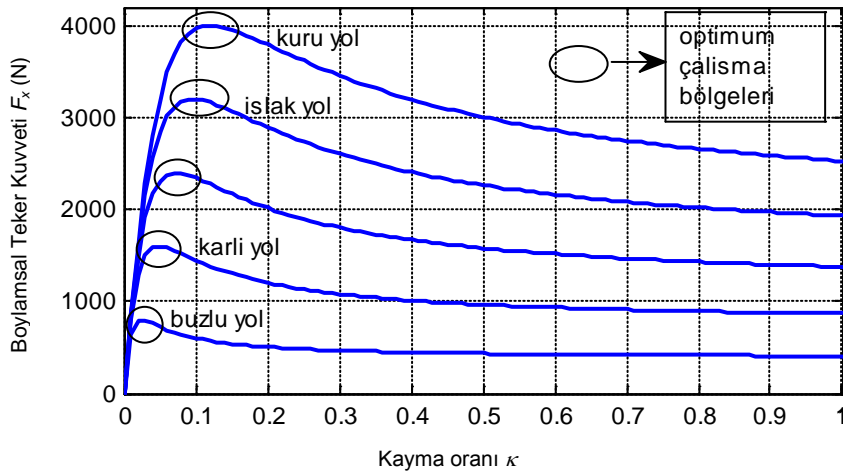
Şekil 1'de görüldüğü gibi, eğer tekerleklerin yavaşlama ivmesi bir  $a_1$  değerinden küçükse, sürücünün fren isteği aynen tekerleklere iletilmektedir. Eğer yavaşlama ivmesi  $a_1$  değerini aşarsa sürücü fren isteği aynen iletilmez, bunun yerine fren basıncı sabit tutulur. Eğer tekerleklerin yavaşlama ivmesi artmaya devam eder ve bir  $a_2$  eşik değerini aşarsa, tekerleklerin kilitleme tehlikesi söz konusu olduğundan tekerleklerdeki fren basıncı azaltılır. Bu durumda tekerleklerin yavaşlama ivmesi tekrar azalır ve bir önceki mod aktif olur. Bu

şekilde tut-bıraklar ile kilitlemeden frenleme gerçekleştirilir. Bu tip ABS algoritmaları basittir ve tekerleklerin kilitlemesini engellemekle birlikte tekerleklerin maksimum frenleme potansiyelini tam olarak ortaya çıkaramamaktadırlar. Bu amaçla literatürde daha ileri yöntemler geliştirilmektedir. Bu yöntemlerde tekerleklerin frenleme potansiyelini maksimum seviyeye çıkarmak için tekerleklerin kayma oranı (slip ratio) değeri belli bir optimum değere yaklaştırılmaya çalışılır.



Şekil 2. Tekerlek modeli

Tekerlek kayma oranının (slip ratio) tanımı için Şekil 2'de verilen tekerlek modeli göz önüne alınsın.  $R$  yarıçaplı,  $\omega$  açısal hızı ile dönen ve  $u$  hızı ile ilerleyen bir tekerlek için kayma oranı  $\kappa$  (kappa)  $\kappa = \frac{u - \omega R}{u}$  şeklinde tanımlanır. Bu denklemde eğer tekerleğin boylamsal hızı  $u$  ile eşdeğer dönme hızı  $\omega R$  birbirine eşit ise kayma oranı sıfırdır. Fakat hızlanma durumunda  $\omega R > u$  ve yavaşlama durumunda  $\omega R < u$  olur. Bu durumlarda tekerlek kayma oranı  $\kappa$  sıfırdan farklı değerler alır. Frenleme sırasında tekerlekler kilitlenirse (yani  $\omega = 0$  ise) fakat tekerlek doğrusal hareketine devam ediyorsa ( $u \neq 0$ ) kayma oranı  $\kappa = 1$  değerini alır. Kayma oranının değişimine göre tekerleğin ürettiği kuvvetin değişimi Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Farklı yol koşullarında boylamsal tekerlek kuvveti karakteristiği

Şekil 3'te görüldüğü gibi kayma oranı değeri arttıkça boylamsal tekerlek kuvveti  $F_x$  (frenleme kuvveti) artmakta, bir tepe noktasını geçtikten sonra ise kuvvet azalmaya başlamaktadır. Tekerleklerin kilitleme durumunda yani  $\kappa=1$  olduğunda ise oluşan fren kuvveti Şekil 3'te görüldüğü gibi elde edilebilecek maksimum değerden düşüktür. Bu da tekerlekler kilitletiğinde aracın durma mesafesinin neden uzadığının cevabıdır. Maksimum frenleme kuvvetini elde etmek için kayma oranı değerinin belli bir optimum değerinde tutulması gerekmektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi fren kuvvetini maksimize edecek kayma oranının optimum değeri yol koşullarına göre değişmektedir.

Literatürde ABS kontrolü alanında yapılan çalışmalar yöntem açısından temelde üç ana gruba ayrılmaktadır. Birinci gruptaki çalışmalarda optimum frenleme performansı için gereken optimum kayma oranı değerinin önceden bilindiği varsayılmaktadır. Böylece kontrol problemi, belli bir andaki kayma oranı değerinin bu optimum kayma oranı değerine yaklaştırılması şeklinde olmaktadır. Bu gruptaki çalışmalar optimalite özelliği içermemektedirler çünkü Şekil 3'te görüldüğü gibi maksimum fren kuvvetini sağlayacak kayma oranı değeri sabit değildir ve yol koşulları ile değişmektedir. Literatürdeki ikinci grup ABS kontrolü çalışmalarında ise optimum kayma oranı değerinin önceden bilinmediği kabul edilmektedir. Optimum değeri bulmak için önce yol koşulları kestirilmekte, kestirilen yol koşuluna uygun kayma oranı değerine göre de tekerlekler kontrol edilmektedir. Bu ikinci grup algoritmaların performansı yol koşullarını ne kadar doğru ve çabuk bir şekilde kestirdiklerine bağlıdır. Bu ise, acil durum frenlemesi gibi ani ve hızlı gerçekleşen durumlarda zor ve güvenilir değildir. Üçüncü grup ABS algoritmalarında ise yine ikinci gruptakiler gibi optimum kayma oranı değerinin önceden bilinmediği kabul edilmektedir. İkinci grup yöntemlerden farklı olarak, yol koşulunu kestirmeye çalışmadan optimum kayma değeri optimizasyon algoritmaları ile anlık olarak bulunmaya çalışılmaktadır. Daha detaylı literatür bilgisi raporun literatür özeti kısmında verilmiştir.

Bu projede yol koşulları bilgisine ihtiyaç duymadan, optimum frenleme performansını sağlayan bir optimizasyon algoritması geliştirilmiş ve bu algoritma deneysel bir sisteme uygulanmıştır. Bu çerçevede, geliştirilen algoritma yukarıda verilen grupta üçüncü gruba dahildir. Projede, Ekstremum Arama Algoritması (EAA) temelli ABS kontrol algoritması geliştirilmiştir. Literatüre getirilen bir yenilik olarak, arama algoritmasında kullanılan parametreler uyarlamalı hale getirilerek Uyarlamalı Ekstremum Arama Algoritması tabanlı ABS Kontrolcüsü geliştirilmiştir. Bu şekilde, algoritmanın hızlı bir şekilde optimum çalışma noktasını bulması, bulduktan sonra ise parametrelerin uyarlanarak optimum nokta etrafında düşük genlikli salınımlar ile frenleme performansının önemli ölçüde iyileştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, literatürde önerilen ABS kontrol algoritmalarının hemen hemen hepsi sadece bilgisayarda gerçekleştirilen simülasyonlar ile doğrulanmakta, gerçek bir sistemde,



gerçek zamanlı uygulanabilirlikleri soru işareti olarak kalmaktadır. Bu projede, bir ABS deney düzeneği satın alınarak gerçek bir sistemde gerçek zamanlı olarak çalışabilen bir kontrol algoritması geliştirilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde ABS kontrolü alanında yapılan çalışmalar yöntem açısından temelde üç ana gruba ayrılmaktadır. Birinci gruptaki çalışmalarda (Sharkawy, 2010; Harifi vd., 2008; Mitić vd., 2013; Mirzaeinejad ve Mirzaei, 2010; Lin vd., 2013; Kayacan vd., 2009; Jing vd., 2011) optimum frenleme performansı için gereken kayma oranı değerinin önceden bilindiği varsayılmaktadır. Böylece kontrol problemi, belli bir andaki kayma oranı değerinin bu optimum kayma oranı değerine yaklaştırılması şeklinde olmaktadır.

Literatürdeki ikinci grup ABS kontrolü çalışmalarında (Bhandari vd., 2012; Patel vd., 2007; Rattasiri vd., 2007; Cabrera vd., 2005) optimum kayma oranı değerinin önceden bilinmediği kabul edilmektedir. Optimum kayma oranı değerini bulmak için önce yol koşulları kestirilmekte, kestirilen yol koşuluna uygun kayma oranı değerine göre de tekerlekler kontrol edilmektedir.

Üçüncü grup ABS algoritmalarında (Drakunov vd., 1995; Tanelli vd., 2008; Zhang ve Ordonez, 2007; Dincmen vd., 2014; Dincmen, 2014; Haskara vd., 2000; Capra vd., 2012) ise yine ikinci gruptakiler gibi optimum kayma oranı değerinin önceden bilinmediği kabul edilmektedir. İkinci grup yöntemlerden farklı olarak, yol koşulunu kestirmeye çalışmadan optimum kayma değeri optimizasyon algoritmaları ile anlık olarak bulunmaya çalışılmaktadır. Yukarıda verilen birinci grup algoritmalar, hedef kayma oranı değerinin önceden bilindiği varsayıldığı için optimallik ilkesi içermezler çünkü gerçekte optimum kayma oranı değeri sabit değildir ve farklı yol koşullarında farklı değerler almaktadır. İkinci grup algoritmaların performansı ise yol koşullarını ne kadar doğru ve çabuk bir şekilde kestirdiklerine bağlıdır. Bu ise, acil durum frenlemesi gibi ani gerçekleşen durumlarda zor ve güvenilir değildir.

Bu projede, optimum kayma oranı değerini önceden bilmeden ve yol koşullarını kestirmeye çalışmadan, maksimum fren kuvvetini verecek optimum kayma oranı değerinin anlık olarak arandığı bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma yukarıda verilen sınıflamaya göre üçüncü gruba girmektedir. Anlık optimizasyon algoritması olarak literatürde Ekstremum Arama Algoritması (EAA) olarak geçen algoritma kullanılmıştır. Bu algoritma, sistemin performans fonksiyonunun tamamen veya kısmen bilinmediği, zamanla değişebildiği, sistemin doğrusal olmadığı, belirsizlik ve bozucular içerdiği durumlar için uygundur. Örneğin acil durum frenlemesinde ihtiyaç duyulduğu gibi, bilinmeyen yol koşullarında tekerlek ile yol arasındaki frenleme kuvvetlerinin maksimize edilmesi problemi EAA'nın uygulama alanına girmektedir.

Literatürde Ekstremum Arama Algoritmaları (EAA) temelde dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar perturbasyon tabanlı, kayma kipli tabanlı, sayısal optimizasyon tabanlı, ve gradyan tabanlı ekstremum arama algoritmalarıdır. Perturbasyon tabanlı EAA'da (Krstic ve Wang, 2000;

Zhang vd., 2007) arama sinyaline bir perturbasyon eklenir. Bu perturbasyonun performans ölçütüne etkisi incelenerek optimum değere ulaşmak için arama sinyalinin değerinin artırılması mı azaltılması mı gerektiğine karar verilir. Burada performans ölçütü fonksiyonunun biçiminin bilinmediği varsayılmaktadır. Kayma kipli tabanlı EAA'da (Drakunov vd., 1995; Dincmen vd., 2014; Korovin ve Utkin, 1974; Drakunov, 1993; Haskara vd., 2000; Dincmen ve Guvenc, 2012) yine performans ölçütü fonksiyonunun biçiminin bilinmediği varsayılmaktadır. Bu yöntemde bir kayma yüzeyi tanımlanmakta, bu yüzey üzerinde performans ölçütü zamanla artan ya da azalan bir fonksiyonu takip etmeye zorlanmaktadır. Böylece performans ölçütü maksimize ya da minimize edilmektedir. Sayısal optimizasyon tabanlı EAA'da ise (Zhang ve Ordonez, 2007; Popovic vd., 2006) iteratif yöntemler kullanılarak amaç fonksiyonunun optimum noktası aranmaktadır. Sayısal optimizasyon algoritması bir sonraki sistem durumunu bulmakta, durum regülatörü de sistemi bu yeni duruma getirmeye çalışmaktadır. Gradyan tabanlı EAA'da (Guay ve Zhang, 2003; DeHaan ve Guay 2005) ise yukarıda anlatılan üç grup EAA'dan farklı olarak amaç fonksiyonunun şeklinin bilindiği fakat sistemin modelinde ve amaç fonksiyonunda belirsiz parametreler olduğu varsayılmaktadır. Bu belirsizlikler altında amaç fonksiyonunun ekstremum noktası aranmaktadır.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu projede Ekstremum Arama Algoritması (EAA) temelli bir ABS kontrol algoritması geliştirilmiştir. Algoritma, yol koşulları bilgisine ihtiyaç olmadan, optimum frenleme performansı için gereken optimum fren basıncını kendi kendine arayan bir optimizasyon algoritmasıdır. Kayma oranının değişimine göre tekerleğin ürettiği kuvvetin değişimi Şekil 3'te farklı yol koşulları için görülmektedir. Amaç, yol koşulu bilgisinden bağımsız optimum çalışma bölgelerini bulmaktır.

Proje önerisinde bahsedildiği gibi arama algoritmasında kullanılacak parametreler uyarlamalı hale getirilerek Uyarlamalı Ekstremum Arama Algoritması tabanlı ABS Kontrolcüsü geliştirilmiştir. Bu şekilde, algoritmanın hızlı bir şekilde optimum çalışma noktasını bulması, bulduktan sonra ise parametrelerin uyarlanarak optimum nokta etrafında düşük genlikli salınımlar ile frenleme performansının önemli ölçüde iyileştirilmesi sağlanmıştır.

#### 3.1 Algoritmanın Teorik Temellerinin Kurulması

Bu raporda önce arama algoritmasının parametrelerinin sabit olduğu durum için analiz yapılmış daha sonra parametre uyarlama kuralı eklenmiştir. Parametrelerin sabit olduğu durum için kayma kipli kontrolörde kayma yüzeyi  $s$  şu şekilde seçilir:

$$s = F_x(\kappa) + \rho t \quad (1)$$

burada  $\kappa$  (kappa) kayma oranı,  $t$  zaman değişkeni,  $\rho$  ise pozitif bir sabittir. Kayma yüzeyi  $s$ 'nin bu şekilde seçilmesindeki amaç,  $F_x$  kuvvetini  $\rho t$  gibi zamanla artan bir fonksiyonu takip etmeye zorlamaktır. (1) in türevi alınırsa

$$\dot{s} = \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} \dot{\kappa} + \rho \quad (2)$$

elde edilir. Kayma oranı  $\kappa$ ' nın zamanla değişim formülü şu şekilde seçilir,

$$\dot{\kappa} = M \operatorname{sgn} \left[ \sin \left( \frac{\pi s}{\gamma} \right) \right] \quad (3)$$

burada  $M$ , ve  $\gamma$  pozitif sabitlerdir,  $\operatorname{sgn}$  ise işaret fonksiyonudur. Ekstremum arama algoritmasına göre,

$$\left| \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} \right| > \frac{\rho}{M} \quad (4)$$

eşitsizliği geçerli oldukça fren kuvveti artarak maksimum değerine ulaşmaktadır. Bunu ispatlamak için önce (3), (2) numaralı denklemde yerine yazılarak aşağıdaki ifade elde edilsin.

$$\dot{s} = \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} M \operatorname{sgn} \left[ \sin \left( \frac{\pi s}{\gamma} \right) \right] + \rho \quad (5)$$

Optimizasyon sürecinin başında, (1) denklemindeki  $s$  değerinin  $\gamma$  ve  $2\gamma$  değerleri arasında olduğu varsayalım, yani  $\gamma < s(0) < 2\gamma$ . olsun. Bu durumda, bu aralık için aşağıdaki matematiksel ifadeler yazılabilir.

$$\operatorname{sgn} \left[ \sin \left( \frac{\pi s}{\gamma} \right) \right] = -\operatorname{sgn}(s - \gamma) \text{ ya da } \operatorname{sgn} \left[ \sin \left( \frac{\pi s}{\gamma} \right) \right] = \operatorname{sgn}(s - 2\gamma) \quad (6)$$

(5) ve (6)'daki ifadeler birleştirilirse aşağıdaki kayma yüzeyi dinamiği ifadelerine ulaşılır.

$$\dot{s} = -\frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} M \operatorname{sgn}(s - \gamma) + \rho \text{ ya da } \dot{s} = \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} M \operatorname{sgn}(s - 2\gamma) + \rho \quad (7)$$

Şimdi bir değişken olarak  $\lambda$  şu şekilde tanımlansın:  $\lambda = s - \gamma$  ya da  $\lambda = s - 2\gamma$ . Türevi  $\dot{\lambda} = \dot{s}$  olduğuna göre, (7) denklemleri şu hale gelir,

$$\dot{\lambda} = -\frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} M \operatorname{sgn}(\lambda) + \rho \text{ ya da } \dot{\lambda} = \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} M \operatorname{sgn}(\lambda) + \rho \quad (8)$$

(8) numaralı denklemlerden ise aşağıdaki eşitsizliklere ulaşılır,

$$\lambda \dot{\lambda} \leq -\left| \lambda \right| \left[ \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} M - \rho \right] \text{ ya da } \lambda \dot{\lambda} \leq \left| \lambda \right| \left[ \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} M + \rho \right] \quad (9)$$

(9) numaralı eşitsizliklerde, (4) numaralı koşul geçerli olduğu sürece, yani  $\frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} > \frac{\rho}{M}$  ise

(9)'daki ilk denklemden,  $\frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} < -\frac{\rho}{M}$  ise (9)'daki ikinci denklemden anlaşılmaktadır ki  $\lambda$  değeri sonlu bir zaman sonra sıfıra ulaşır çünkü (9) numaralı eşitsizlikler sonlu zamanda yakınsama (finite time convergence) koşullarını sağlarlar. Sonlu bir zaman sonra  $\lambda = 0$ , yani  $s = \gamma$  ya da  $s = 2\gamma$  olur.

Şimdiye kadar yürütülen analiz ile görülmektedir ki, optimizasyonun başlangıcında  $s$  değeri  $\gamma < s(0) < 2\gamma$  aralığında olduğunda, (4) koşulu geçerli ise,  $s$  değişkeni sonlu bir zaman sonra  $\gamma$  ya da  $2\gamma$  değerlerine ulaşmaktadır. Benzer şekilde gösterilebilir ki sadece  $\gamma < s(0) < 2\gamma$  için değil  $s$ 'nin herhangi bir başlangıç değeri  $s(0)$  için  $s$  değeri sonlu bir zaman sonra  $s = k\gamma$ , ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) gibi sabit bir değere yaklaşacaktır. Bu durumda (1) denklemi şu şekilde yeniden yazılabilir,

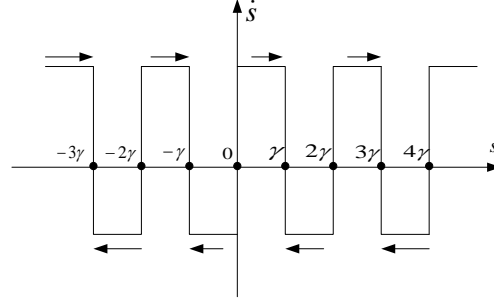
$$s = k\gamma = F_x(\kappa) + \rho t \quad (10)$$

$$\dot{F}_x(\kappa) = -\rho \quad (11)$$

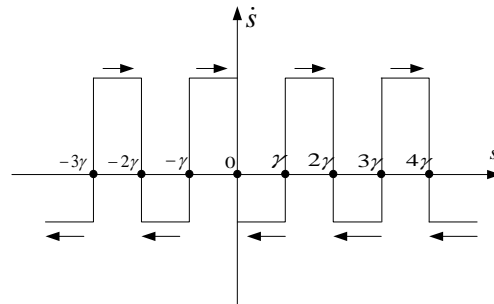
Yani boylamsal teker kuvveti  $F_x$  (frenleme sırasında negatif), bir  $\rho$  eğimi ile artar ve maksimum noktasına doğru yaklaşır.



Yukarıdaki analiz şu şekilde görsellenebilir. (4) numaralı denklem ile verilen koşul geçerli olduğu sürece  $s$  ve  $\dot{s}$  'nin değişimi (5) denklemine göre Şekil 4 ve Şekil 5'teki gibi olacaktır. Şekil 4 ve Şekil 5'teki oklar  $s$  değişkeninin değişim yönünü göstermektedir. Görülmektedir ki başlangıçta  $s$ 'nin değeri ne olursa olsun, sonlu bir zaman sonra  $s = k\gamma$  ; ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) gibi sabit bir değere yaklaşmaktadır.



Şekil 4.  $s$  ve  $\dot{s}$  'nin (5) denklemine göre değişimi ( $dF_x(\kappa)/d\kappa > \rho/M$  olduğu durum)



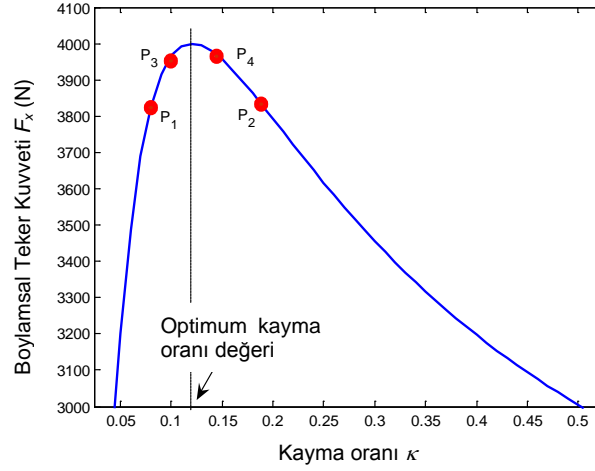
Şekil 5.  $s$  ve  $\dot{s}$  'nin (5) denklemine göre değişimi ( $dF_x(\kappa)/d\kappa < -\rho/M$  olduğu durum)

Geleneksel kayma kipli kontrol teorisinden farklı olarak, sonlu bir zaman sonra, kayma yüzeyi değişkeni  $s$  sabit bir değer almaktadır. Şekil 4 ve Şekil 5'te görüldüğü gibi, bölgelerin arasındaki mesafe  $\gamma$  dır. Bu mesafe küçük seçilirse,  $s$  'nin sabit bir değere yakınsaması da kısa sürecektir.

(4) numaralı denklem ile verilen koşul, Şekil 3'te verilen kuvvet-kayma oranı eğrisinin gradyanı olan  $|dF_x(\kappa)/d\kappa|$  değerinin sabit bir değer olan  $\rho/M$  'den büyük olması durumudur. Gradyan,  $\rho/M$  değerinden büyük oldukça ekstremum arama algoritması amaç fonksiyonunu artmaya zorlayacaktır. Sonunda,  $F_x$  Şekil 3'te görüldüğü gibi tepe noktasının yakınındaki bir bölgeye ulaşacaktır. Bu bölgeden sonra artık gradyan yeterince büyük değildir yani (4) numaralı denklem ile verilen koşul geçerli olmamaya başlar.

Şekil 6'da  $P_1$  ve  $P_2$  noktaları, gradyanın  $\rho/M$  değerinden küçük olmaya başladığı bölgeleri temsil etsin. Bu noktaların altında  $|dF_x(\kappa)/d\kappa| > \rho/M$  olduğu için, (11) denklemine göre ekstremum arama algoritması fren kuvvetini  $P_1$  ya da  $P_2$  noktalarına ulaşana kadar arttıracaktır.

Çalışma noktası  $P_1$  ya da  $P_2$  noktasına ulaştığında, (4) numaralı koşul artık geçerli olmamasına rağmen fren kuvveti değeri tepe noktasına doğru hareket etmeye yani kayma oranı değeri  $\kappa$  optimum değerine doğru yaklaşmaya devam edecektir. Bu davranışın nedeni aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 6. Amaç fonksiyonu

Çalışma noktası  $P_1$  ya da  $P_2$  noktasına ulaştığında artık  $|dF_x(\kappa)/d\kappa| < \rho/M$  olduğu için (5) numaralı denklemden aşağıdaki ifade yazılır

$$\dot{s} = \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} M \operatorname{sgn} \left[ \sin \left( \frac{\pi s}{\gamma} \right) \right] + \rho > 0 \quad (12)$$

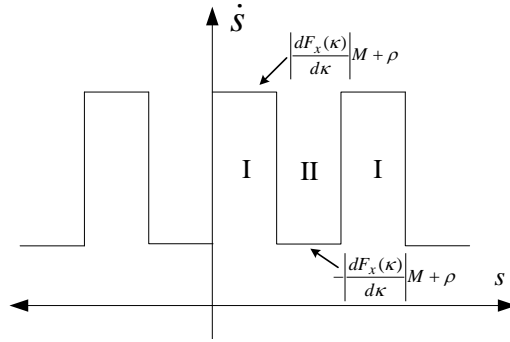
bunun anlamı  $s$  artık sabit bir sayı değildir ve değeri aşağıdaki denklemlerde verilen hızlar mertebesinde artmaktadır,

$$\frac{ds}{dt} = \left| \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} \right| M + \rho > 0 \quad \text{ya da} \quad \frac{ds}{dt} = - \left| \frac{dF_x(\kappa)}{d\kappa} \right| M + \rho > 0 \quad (13)$$

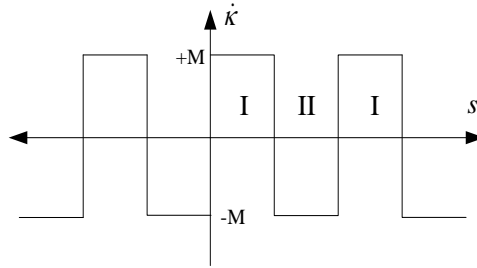
$s$  değeri arttıkça, (3) denklemine göre,  $\dot{\kappa}$  değeri  $(+M)$  ve  $(-M)$  değerleri arasında salınım yapar. Şimdi gradyen  $dF_x(\kappa)/d\kappa$  'nın pozitif olduğu durum ele alınsın yani tekerleğin çalışma noktası Şekil 6'da  $P_1$  ve  $P_3$  noktaları arasında olsun. Bu durumda  $s$  ve  $\dot{s}$ 'nin değişimleri, (12) denklemine göre Şekil 7'de görüldüğü gibi,  $\dot{\kappa}$ 'nın değişimi ise Şekil 8'deki gibi olacaktır. Şekil 7'de görüldüğü gibi  $s$  değişirken, II numaralı bölgeyi I numaralı bölgeden daha yavaş yani daha uzun sürede geçecektir çünkü bu bölgede  $s$ 'nin türevinin değeri daha küçüktür. Bunun sonucunda Şekil 8'e göre  $\dot{\kappa}$ ,  $(+M)$  değerinden daha fazla  $(-M)$  değeri alacaktır.  $\dot{\kappa}$  daha fazla negatif değer alacağı için  $\kappa$  değeri azalmaya devam edecek ve optimum değerine doğru yaklaşıp, yani Şekil 6'daki çalışma noktası  $P_1$  den  $P_3$  noktasına doğru ilerleyecektir. Burada hatırlatılmalıdır ki frenleme durumunda kayma oranı  $\kappa$  değerleri negatiftir, bu yüzden  $\kappa$

değerinde azalma demek, bu değerın Şekil 6'da sağa doğru yani tepe noktasının bulunduğu yere doğru ilerlemesi demektir.

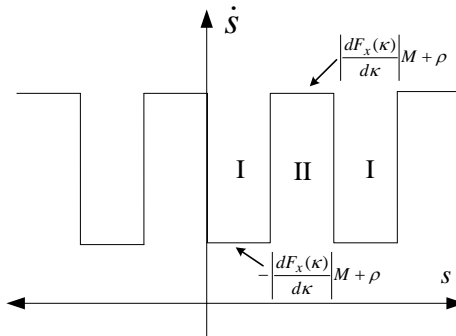
Eğer çalışma noktası Şekil 6' da  $P_2$  ve  $P_4$  noktaları arasında ise yani gradyenin negatif olduğu bölgede ise,  $s$  ve  $\dot{s}$  nın değişimi (12) denklemine göre Şekil 9'dakine benzer olacaktır. Bu durumda  $s$ , I numaralı bölgeyi II numaralı bölgeden daha yavaş geçecektir. Bunun sonucunda  $\dot{\kappa}$ ,  $(-M)$  değerlerinden daha fazla  $(+M)$  değerleri alacaktır. Bu da  $\kappa$  değerinin artması yani çalışma bölgesinin Şekil 6'da  $P_2$  den  $P_4$  noktasına doğru yaklaşması demektir. Frenlemede  $\kappa$  değerleri negatif olduğu için, değerindeki artış demek, Şekil 6'da sola doğru hareket demektir.



Şekil 7.  $s$  ve  $\dot{s}$  nın değişimi, (4) numaralı koşulun geçerli olmadığı ve  $dF_x(\kappa)/d\kappa > 0$  olduğu durum için



Şekil 8. (3) denklemine göre  $\dot{\kappa}$ 'nın değişimi



Şekil 9.  $s$  ve  $\dot{s}$  nın değişimi, (4) numaralı koşulun geçerli olmadığı ve  $dF_x(\kappa)/d\kappa < 0$  olduğu durum için

En sonunda, kayma oranı  $\kappa$  değeri, tepe noktasına yakın bir bölgede, Şekil 6'da  $P_3$  ve  $P_4$  noktaları ile gösterilen bölgede salınım yapmaya başlar. Uyarılama kazancı  $M$ 'nin değerinin

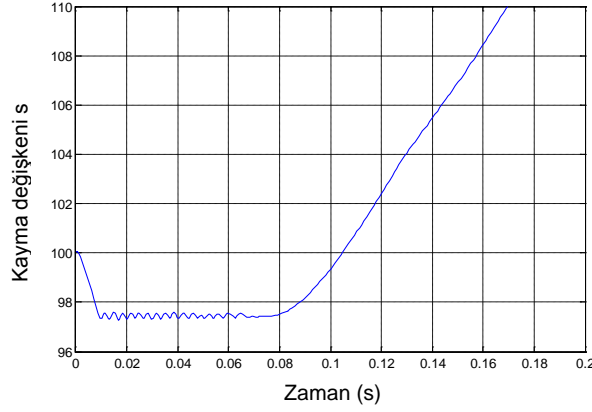
küçük seçilmesi ekstremum nokta etrafında düşük genlikli salınımlar sonucunu doğurur. Diğer bir ifade ile  $P_3$  ve  $P_4$  noktaları birbirlerine yakın olur. Fakat küçük  $M$  seçilmesi,  $\kappa$ 'nın değişiminin  $P_1$  ve  $P_2$  noktalarının altındaki bölgede yavaş olması sonucunu doğurur. Yani  $P_1$  ve  $P_2$  noktalarına yaklaşma hızı düşük olacaktır. Bu nedenle bu projede, değişken uyarılama kazancı önerilmiştir. Çalışma noktası  $P_1$  ya da  $P_2$  noktalarının altında olduğunda uyarılama kazancı büyük seçilecek böylece bu noktalara yaklaşma hızı yüksek olacaktır. Çalışma noktası  $P_1$  ya da  $P_2$  noktasına ulaştığında (4) numaralı denklemde verilen koşul artık geçerli olmamaya ve (12) denkleminde ifade edildiği gibi  $s$  değeri artmaya başlayacaktır. Kayma değişkeni  $s$  değerindeki bu değişim gözlenerek ekstremum noktasına yaklaşıldığı anlaşılır. Bu andan sonra uyarılama kazancının değeri azaltılarak sistemin tepe noktası etrafında düşük genlikli salınımlar yapması sağlanır.

Kazanç  $M$  için bir uyarılama kuralı tanımlamak için (1) numaralı denklemdeki kayma değişkeni  $s$  aşağıdaki şekilde yeniden yazılsın

$$s = F_x(\kappa) + \rho t + \rho_0 \quad (14)$$

burada  $\rho_0$  pozitif bir sabittir. Kayma değişkeni  $s'$  nin yukarıdaki gibi seçilmesiyle frenleme anı başlangıcında  $s$  değerinin başlangıç değerinin  $s(0) = \rho_0$  olması sağlanmış olur.

Şekil 4 ve Şekil 5'te görüldüğü gibi (4) koşulu sağlandığı sürece  $s$  artar veya azalır ve sabit bir  $s = k\gamma$ , ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) değerine ulaşır. Bölümlerin arasındaki mesafe  $\gamma$  olduğu için tüm bu süre boyunca  $s < \rho_0 + \gamma$  eşitsizliği geçerli olur. Frenleme devam ettikçe, bir süre sonra (4) koşulu artık geçerli olmaz ve  $s'$  nin değeri artmaya başlar. Bu da  $s > \rho_0 + \gamma$  eşitsizliğinin geçerli olmaya başlaması sonucunu doğurur. Simulasyon çalışmalarında  $\rho_0$  değeri 100 seçilmiştir. Frenleme algoritması çalışırken  $s$  değişkeninin değişimi Şekil 10'da çizdirilmiştir. Şekilden anlaşılmaktadır ki başlangıçta  $s(0) = \rho_0 = 100$  dür. Sonlu bir süre sonra (yaklaşık 0.01 saniye),  $s$  değişkeni sabit bir değere yakınsar (yaklaşık 97.5). Bu, (11) denkleminde görüldüğü gibi performans fonksiyonunun bir optimum çalışma noktasına doğru sürekli olarak artırılmasını garanti eder. Ekstremum noktasına yaklaştıkça gradyan gittikçe küçülür ve sonunda (4) koşulu geçerli olmamaya başlar (Şekil 6'da  $P_1$  ve  $P_2$  noktaları). Daha sonra, (13) denkleminde görüldüğü gibi  $s$  değeri artmaya başlar. Şekil 10'a göre bu olay yaklaşık 0.08 saniye sonra gerçekleşmeye başlamaktadır.  $s$  değerinin arttığının gözlemlenmesi ile ekstremum noktası yakınına ulaşıldığı anlaşılır. Tepe noktası etrafında düşük genlikli salınım ile frenleme için uyarılama kazancı  $M$  bu andan sonra azaltılacaktır.



Şekil 10.  $s$  değişkeninin zamanla değişimi

Kazanç  $M$  için uyarlama algoritması şu şekilde seçilmiştir,

$$M(s) = \begin{cases} M_1 & \text{eger } s < \rho_0 + \gamma \\ M_2 & \text{eger } s > \rho_0 + \gamma \end{cases} \quad (15)$$

burada  $M_1 > M_2$  pozitif sabitlerdir. (15) denklemini matematiksel olarak şöyle formüle edilebilir,

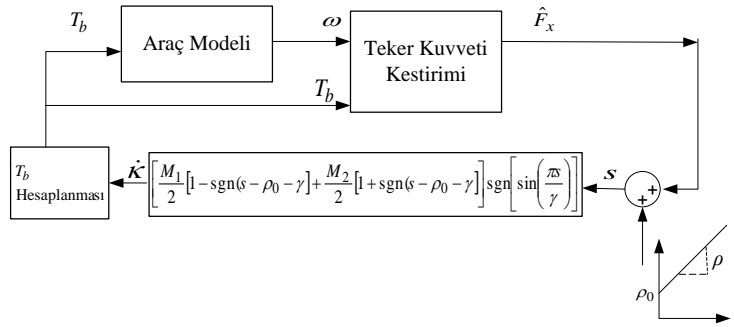
$$M(s) = \frac{M_1}{2} [1 - \text{sgn}(s - \rho_0 - \gamma)] + \frac{M_2}{2} [1 + \text{sgn}(s - \rho_0 - \gamma)] \quad (16)$$

(4) numaralı koşul geçerli olduğu sürece uyarlama kazancı büyük seçilir ( $M_1$ ), böylece Şekil 6'daki  $P_1$  ya da  $P_2$  noktalarına hızlı yakınsama sağlanır.  $P_1$  ya da  $P_2$  geçildikten sonra  $s$  artmaya başlar. Bu andan sonra uyarlama kazancı küçük seçilerek ( $M_2$ ), sistemin tepe noktası etrafında düşük genlikli salınım yapması sağlanır.

Uyarlama kazancı (16)'daki gibi seçilirse (3)'te verilen  $\dot{\kappa}$  ifadesi (17)'deki şekline dönüşür.

Tüm algoritmanın kontrol şeması ise Şekil 11'de görülmektedir.

$$\dot{\kappa} = \left[ \frac{M_1}{2} [1 - \text{sgn}(s - \rho_0 - \gamma)] + \frac{M_2}{2} [1 + \text{sgn}(s - \rho_0 - \gamma)] \right] \text{sgn} \left[ \sin \left( \frac{\pi s}{\gamma} \right) \right] \quad (17)$$



Şekil 11. ABS için uyarlamalı ekstremum arama algoritması

Simulasyon çalışmalarında çeyrek araç modeli kullanılmıştır. Yol ve tekerlek arasında oluşan kuvvetlerin gerçekçi hesaplanması için Pacejka tekerlek modeli çeyrek araç modeline eklenmiştir. Frenleme momenti  $T_b$ , aşağıda görülen basitleştirilmiş tekerlek dönme dinamiği ile hesaplanır,

$$\dot{\omega} = \frac{-T_b - RF_x}{I_\omega} \quad (18)$$

burada tekerlek yuvarlanma direnci etkisi ihmal edilmiştir. (18) denkleminde  $I_\omega$  tekerleğin atalet momenti,  $R$  etkin tekerlek yarıçapı,  $\omega$  tekerlek açısız hızıdır. Basitleştirilmiş boyuna araç dinamiği ise şu şekilde yazılır,

$$m\dot{u} = F_x \quad (19)$$

burada aerodinamik etkiler ve yol eğimi ihmal edilmiştir. (19) numaralı denklemde,  $m$  aracın kütlesi,  $u$  ise boylamsal hızıdır. Teker kayma oranı şu şekilde hesaplanır,

$$\kappa = -\frac{u - \omega R}{u} \quad (20)$$

(20) denkleminin türevi alınır ve (18), (19) denklemleri ile entegre edilirse, kayma oranı dinamiği şu şekilde yazılır,

$$\dot{\kappa} = \frac{1}{u} \left( -\frac{F_x}{m} - \frac{RT_b}{I_\omega} - \frac{R^2 F_x}{I_\omega} - \frac{F_x}{m} \kappa \right) \quad (21)$$

Burada  $\dot{\kappa}$  için (17) denkleminde görülen uyarılma kuralı yazılırsa gereken frenleme torku (21)'den şu şekilde hesaplanır

$$T_b = -\frac{I_\omega}{R} (\kappa + 1) \frac{F_x}{m} - RF_x - \frac{I_\omega}{R} u \left[ \frac{M_1}{2} [1 - \text{sgn}(s - \rho_0 - \gamma)] + \frac{M_2}{2} [1 + \text{sgn}(s - \rho_0 - \gamma)] \text{sgn} \left[ \sin \left( \frac{\pi s}{\gamma} \right) \right] \right] \quad (22)$$

Frenleme torkunun (22)'den hesaplanabilmesi için  $u$ ,  $\omega$ , ve  $F_x$  değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Boylamsal hız değerlerinin kestirimi için bir ivme ölçer kullanılabilir. Açısız hızlar ise enkoderlar vasıtasıyla elde edilebilir. Tekerlek kuvvetleri doğrudan ölçülemediği için bir gözlemleyici kullanmak gerekir. Burada, bu amaçla bir kayma kipli tabanlı gözlemleyici kullanılmıştır. Bunun için (18) ile verilen tekerlek dinamiği aşağıdaki şekilde tekrar yazılsın.

$$I_\omega \dot{\hat{\omega}} = -RV - T_b \quad (23)$$

Burada  $V$  süreksiz bir fonksiyon olarak şu şekilde seçilmiştir,

$$V = -D \text{sgn}(\tilde{\omega}) \quad (24)$$

$D$  pozitif bir sabit ve  $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$  dir. (23) denkleminin (18) denkleminden çıkarılarak şu ifade elde edilir

$$I_\omega \dot{\tilde{\omega}} = -F_x R - D \text{sgn}(\tilde{\omega}) R \quad (25)$$

Burada her iki taraf  $\tilde{\omega}$  ile çarpılarak

$$I_{\omega} \dot{\tilde{\omega}} \tilde{\omega} = -F_x R \tilde{\omega} - D |\tilde{\omega}| R \quad (26)$$

elde edilir. Buradan aşağıdaki eşitsizlik ifadesine ulaşılır,

$$I_{\omega} \dot{\tilde{\omega}} \tilde{\omega} \leq |F_x| R |\tilde{\omega}| - D |\tilde{\omega}| R \quad (27)$$

(27) denkleminde eğer  $D > \max |F_x|$  ise, sonlu zamanda yaklaşım koşulu geçerli olur ve bir sonlu zaman aralığından sonra  $\tilde{\omega} = 0$ ,  $\dot{\tilde{\omega}} = 0$  eşitlikleri geçerli olur. Bu durumda (25) denkleminde göre şu sonuca ulaşılır: Kayma modunda iken, süreksiz  $V$  fonksiyonunun eşdeğer değeri (equivalent value), tekerlek kuvvetinin kestirilen değerine eşit olur. Yani

$$V_{eq} = \hat{F}_x \quad (28)$$

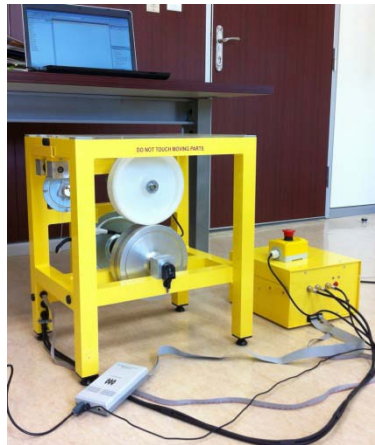
Süreksiz  $V$  fonksiyonunun eşdeğer değerini elde etmek için aşağıdaki şekilde bir alçak geçirgen filtre kullanılabilir.

$$\hat{F}_x = \frac{1}{\tau s + 1} V \quad (29)$$

burada  $\tau$  filtrenin zaman sabitidir.

### 3.2 Deneysel Çalışmalar için Gerekli Gözlemleyicilerin Geliştirilmesi

Deneysel çalışmalarda Şekil 12'de görülen Inteco Ltd tarafından geliştirilen ABS Deney Sistemi kullanılmıştır. Deney sisteminde iki adet tekerlek vardır. Altteki alüminyum tekerlek bağıl yol hareketini taklit ederken üstteki plastik tekerlek araç tekerleğini temsil etmektedir. Altteki tekerleği hızlandırmak için tekerleğe bir DC motor bağlanmıştır. Üstteki tekerlek yine bir DC motor tarafından kumanda edilen bir disk fren sistemi ile donatılmıştır. Altteki tekerlek istenen hız seviyesine ulaşınca üstteki tekerlekte frenleme prosedürü başlatılır. Her iki tekerleğin dönme açıları her bir turda 4096 puls içeren iki adet encoder ile ölçülmektedir. Açısal hızlar ise açı ve zaman bilgisi kullanılarak kestirilmektedir.



Şekil 12. ABS Deney sistemi

Frenleme deneyi sırasında kayma oranı değeri aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır,

$$\kappa = \frac{r_2 x_2 - r_1 x_1}{r_2 x_2} \quad (30)$$

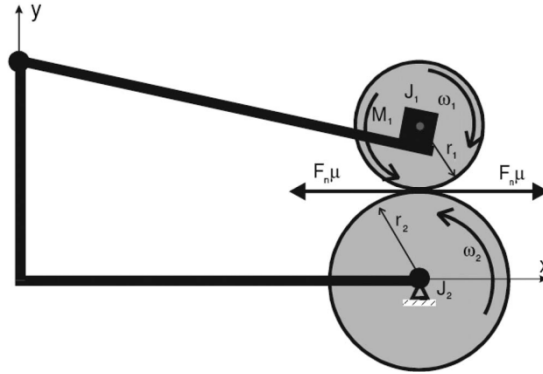
burada  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $x_1$  ve  $x_2$  sırasıyla üst tekerleğin yarıçapı, alt tekerleğin yarıçapı, üst tekerleğin açısal hızı ve alt tekerleğin açısal hızlarıdır. Üst tekerleğin dinamik hareket denklemi şu şekildedir,

$$J_1 \dot{x}_1 = F_x r_1 - d_1 x_1 - M_{10} - M_1 \quad (31)$$

burada  $J_1$ ,  $F_x$ ,  $d_1$ ,  $M_{10}$ ,  $M_1$  sırasıyla üst tekerleğin atalet moment, üst tekerlek ile alt tekerlek arasında oluşan boylamsal kuvvet, üst tekerlekteki viskoz sürtünme katsayısı, üst tekerlekteki statik sürtünme ve üst tekerleğe uygulanan frenleme torkudur. Altteki tekerleğin dinamik denklemi ise şu şekildedir

$$J_2 \dot{x}_2 = -F_x r_2 - d_2 x_2 - M_{20} \quad (32)$$

burada  $J_2$ ,  $d_2$ ,  $M_{20}$ , sırasıyla alt tekerleğin atalet moment, alt tekerleğin viskoz sürtünme katsayısı ve alt tekerlekteki statik sürtünmedir. Deneysel sistemin şematik diyagramı Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 13. ABS deney sisteminin şematik diyagramı

(30) numaralı denklemdeki kayma oranının türevi alınıp (31) ve (32) numaralı dinamik denklemlerle entegre edilir ve (3) numaralı denklemdeki  $\dot{\kappa}$  ifadesi ile eşitlenirse optimum frenleme için gereken frenleme momentinin ifadesi  $M_{des}$  şu şekilde hesaplanır,

$$M_{des} = F_x r_1 + \left( \frac{J_1}{J_2} d_2 - d_1 \right) x_1 - M_{10} + (F_x r_2 + M_{20}) \frac{J_1}{J_2} \frac{x_1}{x_2} + \frac{r_2}{r_1} J_1 x_2 M \operatorname{sgn} \left[ \sin \left( \frac{\pi s}{\gamma} \right) \right] \quad (33)$$

Gerekten frenleme momentinin (33) numaralı denklemden hesaplanabilmesi için  $x_1$ ,  $x_2$  ve  $F_x$  değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Diğer katsayılar deney sistemine ait yapısal katsayılardır ve değerleri bilinmektedir. Üst ve alt tekerleklerin açısal hızları  $x_1$  ve  $x_2$  enkoderlar vasıtasıyla elde edilir. Fren kuvveti  $F_x$  ise deney sisteminde doğrudan ölçülemediği için bir gözlemleyici



tasarlamak gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için (32) numaralı denklem ile verilen alt teker dinamiği ele alınarak şu şekilde yeniden yazılır,

$$J_2 \dot{\hat{x}}_2 = -Br_2 - d_2 x_2 - M_{20} \quad (34)$$

burada  $B$  süreksiz bir fonksiyon olarak şu şekilde seçilir,

$$B = -Q \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) \quad (35)$$

Yukarıdaki ifadede  $Q$  pozitif bir sabit ve  $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$  dir. (34) numaralı denklemin (32) numaralı denklemden çıkarılmasıyla şu ifade elde edilmiş olur,

$$J_2 \dot{\tilde{x}}_2 = -F_x r_2 - Q \operatorname{sgn}(\tilde{x}_2) r_2 \quad (36)$$

Her iki taraf  $\tilde{x}_2$  ile çarpılırsa,

$$J_2 \dot{\tilde{x}}_2 \tilde{x}_2 = -F_x r_2 \tilde{x}_2 - Q |\tilde{x}_2| r_2 \quad (37)$$

elde edilir. Yukarıdaki denklemden de aşağıdaki eşitsizlik ifadesine ulaşılır,

$$J_2 \dot{\tilde{x}}_2 \tilde{x}_2 \leq |F_x| r_2 |\tilde{x}_2| - Q |\tilde{x}_2| r_2 \quad (38)$$

(38) numaralı denklemde, eğer  $Q > |F_x|_{\max}$  koşulu geçerli ise, sonlu zamanda yakınsama şartı geçerli olur ve bir sonlu zaman sonra  $\tilde{x}_2 = 0$ ,  $\dot{\tilde{x}}_2 = 0$  olur. Bu andan sonra, kayma kipinde iken, (36) numaralı denklemde görüldüğü gibi süreksiz  $B$  fonksiyonunun eşdeğer değeri tekerlek kuvvetinin kestirilen değerine eşit olur. Yani,

$$B_{eq} = \hat{F}_x \quad (39)$$

dir. Süreksiz  $B$  fonksiyonunun eşdeğer değerini elde etmek için bir alçak geçiren filtre kullanılırsa aşağıdaki ifadeye ulaşılır,

$$\hat{F}_x = \frac{1}{\tau_1 s + 1} B \quad (40)$$

Burada  $\tau_1$  filtrenin pozitif zaman sabitidir. Tekerlek kuvvetinin kestirilen değeri  $\hat{F}_x$  ve açılmal hızlar  $x_1$  ve  $x_2$  kullanılarak deneysel sistemde optimum frenleme için gereken frenleme torku  $M_{des}$  (33) numaralı denklemden hesaplanır.

Şekil 12'de görülen deney sisteminde kontrol girişi, fren pedalını çeken elektrik motoru kumanda sinyalidir. Motor kumanda sinyali değerleri (burada  $i$  ile gösterilmiştir) 0 ile 1 arasında değerler almaktadır.

$$0 \leq i \leq 1 \quad (41)$$

Eğer  $i = 0$  ise, DC fren motoru fren pedalını hareket ettirmez yani frenleme olmaz. Eğer  $i = 1$  ise, fren pedalı elektrik motoru tarafından tam çekilir yani en kuvvetli frenleme durumu gerçekleşir. Eğer belli bir andaki frenleme momenti  $M_1$  bilirse, (33) numaralı denklemden hesaplanan referans moment  $M_{des}$  değerine ulaşmak için gereken kontrol girişi  $i$

hesaplanabilir. Fakat frenleme momenti  $M_f$  deney sisteminde doğrudan ölçülemediği için bir moment gözlemleyicisi tasarlanması gerekmektedir. Bu amaçla (31) numaralı denklemde verilen üst tekerlek dinamiği gözönüne alınır ve aşağıdaki formda tekrar yazılır,

$$J_1 \dot{\hat{x}}_1 = \hat{F}_x r_1 - d_1 x_1 - M_{10} - H \quad (42)$$

burada  $H$  süreksiz bir fonksiyon olmak üzere,

$$H = -W \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \quad (43)$$

şeklinde tanımlanır.  $W$  pozitif bir sabittir ve  $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1$  dir. (42) numaralı denklem (31)' den çıkarılırsa,

$$J_1 \dot{\tilde{x}}_1 = (F_x - \hat{F}_x) r_1 - M_1 - W \operatorname{sgn}(\tilde{x}_1) \quad (44)$$

elde edilir. Her iki taraf  $\tilde{x}_1$  ile çarpılırsa,

$$J_1 \tilde{x}_1 \dot{\tilde{x}}_1 = (F_x - \hat{F}_x) r_1 \tilde{x}_1 - M_1 \tilde{x}_1 - W |\tilde{x}_1| \quad (45)$$

ifadesine ulaşılır. Buradan da aşağıdaki eşitsizlik ifadesi yazılabilir,

$$J_1 \tilde{x}_1 \dot{\tilde{x}}_1 \leq |F_x - \hat{F}_x| r_1 |\tilde{x}_1| + |M_1| |\tilde{x}_1| - W |\tilde{x}_1| \quad (46)$$

Sabit  $W$  değeri yeterince büyük seçilir ve  $W > |F_x - \hat{F}_x| r_1 + |M_1|_{\max}$  koşulunu sağlarsa sonlu bir zaman sonra,  $\tilde{x}_1 = 0$ ,  $\dot{\tilde{x}}_1 = 0$  doğru olur. (46) numaralı denklemde,  $F_x \cong \hat{F}_x$  olduğu kabul edilirse, kayma kipinde iken süreksiz  $H$  fonksiyonunun eşdeğer değeri,  $M_f$  momentinin kestirilen değerine eşit olur. Yani,

$$H_{eq} = \hat{M}_1 \quad (47)$$

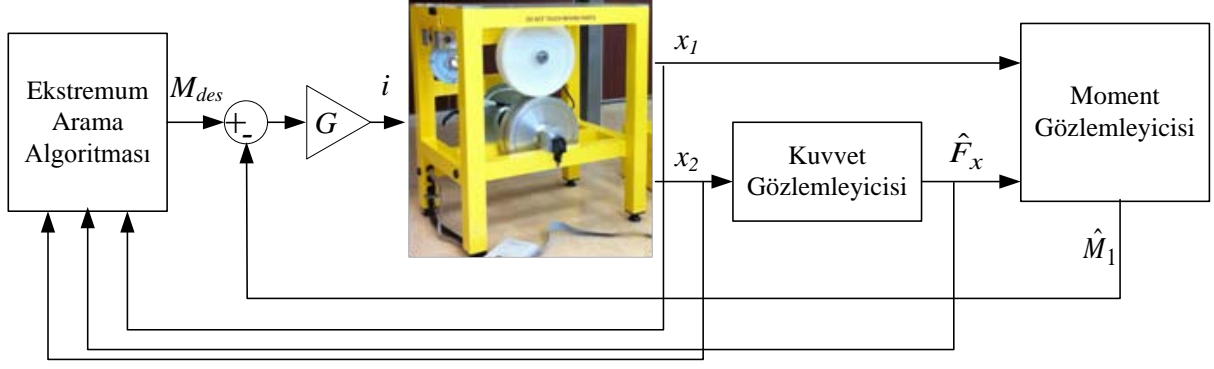
dir. Süreksiz  $H$  fonksiyonunun eşdeğer değerini elde etmek için bir alçak geçiren filtre kullanılırsa,

$$\hat{M}_1 = \frac{1}{\tau_2 s + 1} H \quad (48)$$

elde edilir. Burada  $\tau_2$  alçak geçiren filtrenin pozitif zaman sabitidir. Böylece (33) numaralı denklemde referans moment değeri  $M_{des}$  hesaplanır, (48) numaralı denklemde de momentin kestirilen değeri  $\hat{M}_1$  elde edilir.  $\hat{M}_1$  değerinin  $M_{des}$  değerini takip etmesini sağlamak için fren pedalı motoru komut sinyali  $i$  şu şekilde seçilebilir,

$$i = G(M_{des} - \hat{M}_1) \quad (49)$$

burada  $G$  pozitif bir sabittir. Fren motoru komut sinyali  $i$  değerleri 0 ile 1 değerleri arasında olacak şekilde normalize edilmiştir. Deney sistemi için kontrol yapısı Şekil 14'te görülmektedir.

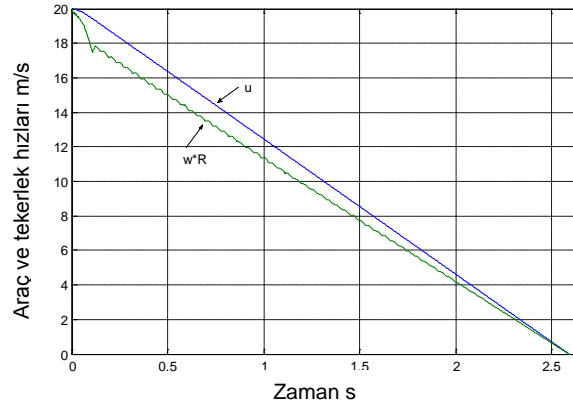


Şekil 14. ABS Deney sistemi kontrol yapısı

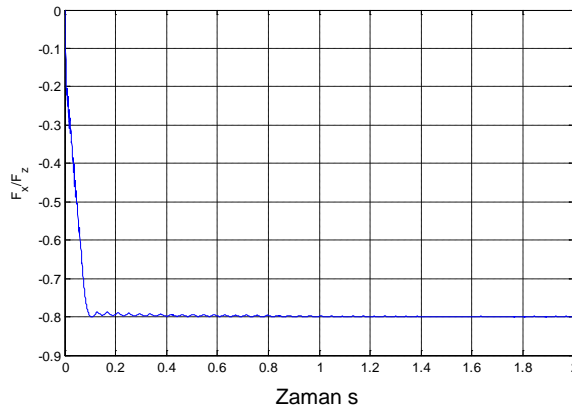
## 4. BULGULAR

### 4.1 Simulasyon Çalışmaları

Simulasyon çalışmalarında başlangıç araç hızı 20 m/s seçilmiştir. Araç hızı ve teker dönme hızları Şekil 15'te görülmektedir. Yol tipi ıslak asfalt olarak seçilmiştir. Bu yol tipinde sürtünme fonksiyonunun maksimum değeri  $\mu_{max} = 0.8$ 'dir. Frenleme sırasında normalleştirilmiş tekerlek kuvvetinin değişimi Şekil 16'da görülmektedir. Burada  $F_z$  araç ağırlığıdır. Bir tekerleğin üretebileceği maksimum frenleme kuvveti  $F_{xmax} = -\mu_{max}F_z$  formülünden hesaplanır. ıslak asfalt yol için  $\mu_{max} = 0.8$  dir. Şekilden görüldüğü gibi yaklaşık 0.1 saniye sonra normalleştirilmiş teker kuvveti  $F_x/F_z = -0.8$  olmaktadır. Bu da demektir ki tekerlek kuvveti maksimize edilmiştir. Kontrolör, yol koşulunu önceden bilmemektedir. Maksimum teker kuvveti için optimum kayma oranı değeri arama algoritması tarafından bulunmuştur.



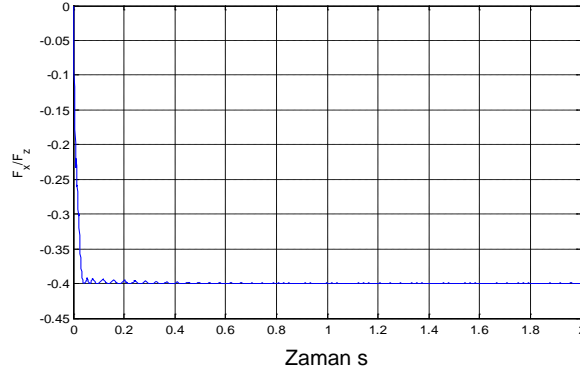
Şekil 15. Frenleme sırasında araç ve tekerlek hızının değişimi



Şekil 16. Normalleştirilmiş boylamsal teker kuvvetlerinin zamanla değişimi (ıslak asfalt yol,  $\mu_{max} = 0.8$ )

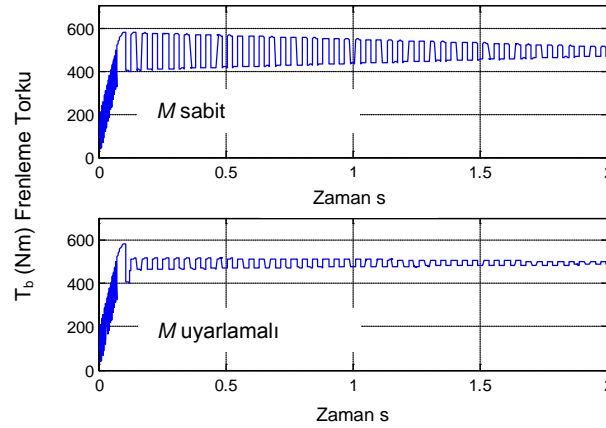
Şekil 17'de ise karlı yol için simulasyon sonuçları görülmektedir. Karlı yolda sürtünme fonksiyonunun maksimum değeri  $\mu_{max} = 0.4$ ' dir. Görülmektedir ki yaklaşık 0.05 saniye sonra normalleştirilmiş tekerlek kuvvetleri  $F_x/F_z = -0.4$  olmaktadır. Bu da, tekerlek kuvvetlerinin

maksimize edildiğini göstermektedir. Bu iki simulasyon senaryosu bilinmeyen yol koşullarında ekstremum arama algoritmasının tekerlek kuvvetlerini maksimize ettiğini göstermektedir.

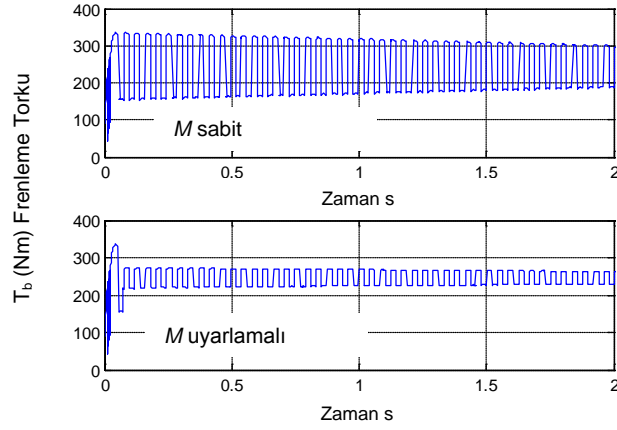


Şekil 17. Normalleştirilmiş boylamsal teker kuvvetlerinin zamanla değişimi (Karlı yol,  $\mu_{max} = 0.4$ )

Şekil 16 ve Şekil 17'deki simülasyonlar sırasında optimizasyon parametresi  $M$ , (16) denkleminde verildiği şekilde uyarlamalıdır. Frenleme torkunun ıslak ve karlı yollarda frenleme sırasındaki değişimleri Şekil 18 ve Şekil 19'da görülmektedir. Sonuçlar optimizasyon parametresi  $M$  'nin hem sabit hem de uyarlamalı olduğu durum için verilmiştir. Görülmektedir ki optimizasyon parametresi  $M$  uyarlamalı yapılarak hem tekerleklerin maksimum frenleme potansiyeli hızlı bir şekilde ortaya çıkarılmakta hem de frenleme momenti cevaplarındaki salınımlar önemli ölçüde azaltılmaktadır.



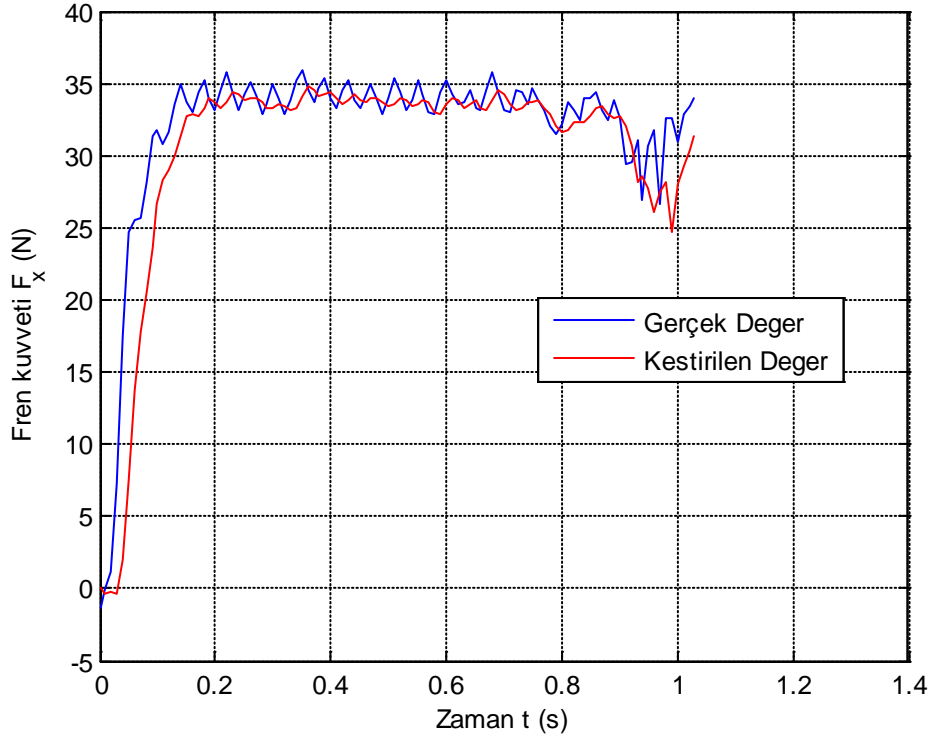
Şekil 18. Islak yolda frenleme sırasındaki fren torklarının değişimi



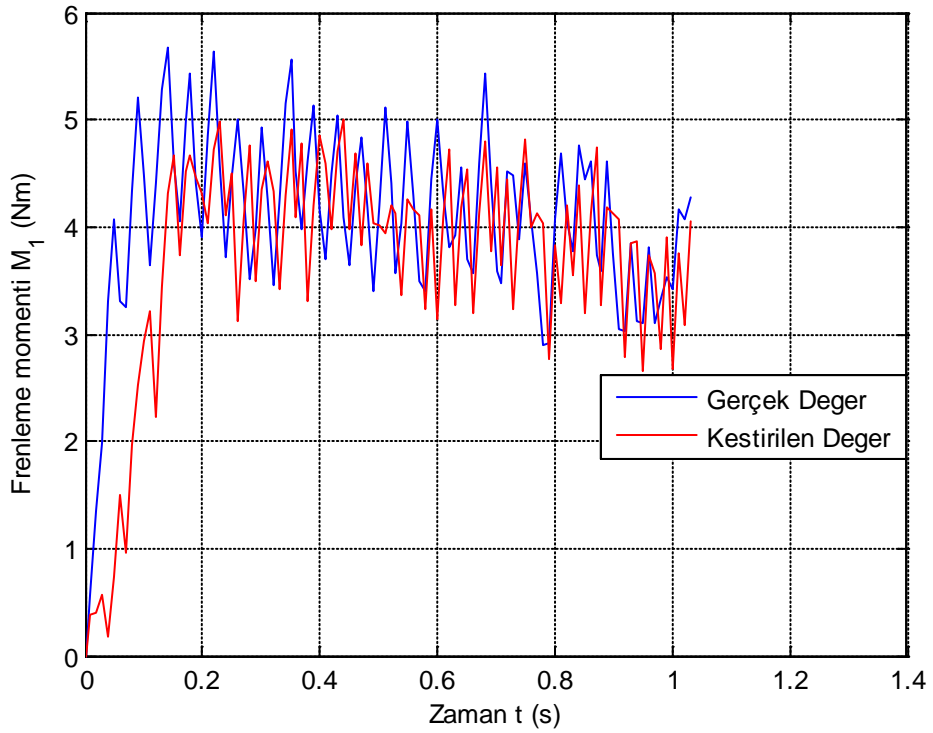
Şekil 19. Karlı yolda frenleme sırasındaki fren torklarının değişimi

#### 4.2 Deneysel Çalışmalar

Deney sisteminde kullanılmak üzere tasarlanan, (40) numaralı denklem ile verilen kuvvet gözlemleyicisi ve (48) numaralı denklem ile verilen moment gözlemleyicilerinin performanslarını değerlendirmek için gerçek kuvvet ve moment değerleri ile kestirilen kuvvet ve moment değerlerini karşılaştırmak gereklidir. Fakat kuvvet ve moment değerleri deney sisteminden doğrudan ölçülememektedir. Bu nedenle gözlemleyici performanslarının değerlendirilmesi için deney sisteminin bilgisayardaki simülasyon modeli kullanılmıştır. Simülasyon modelinden kuvvet ve moment bilgileri elde edilebilmektedir. Bu simülasyon modeli yine Inteco firması tarafından temin edilmiştir. Şekil 14'teki kontrol yapısında gerçek deney sistemi yerine simülasyon modeli kullanılarak, gözlemlenen değerler ile simülasyon modelinden okunan değerler karşılaştırılmıştır. Şekil 20 ve Şekil 21'de karşılaştırmalar görülmektedir. Simülasyon modelinden okunan değerler ile gözlemleyici tarafından hesaplanan değerler birbirlerine yakındır. Buna göre bu gözlemleyiciler gerçek deney sistemindeki deneyler sırasında kontrol girişinin hesaplanması için gereken büyüklüklerin kestirilmesinde kullanılabilirler.

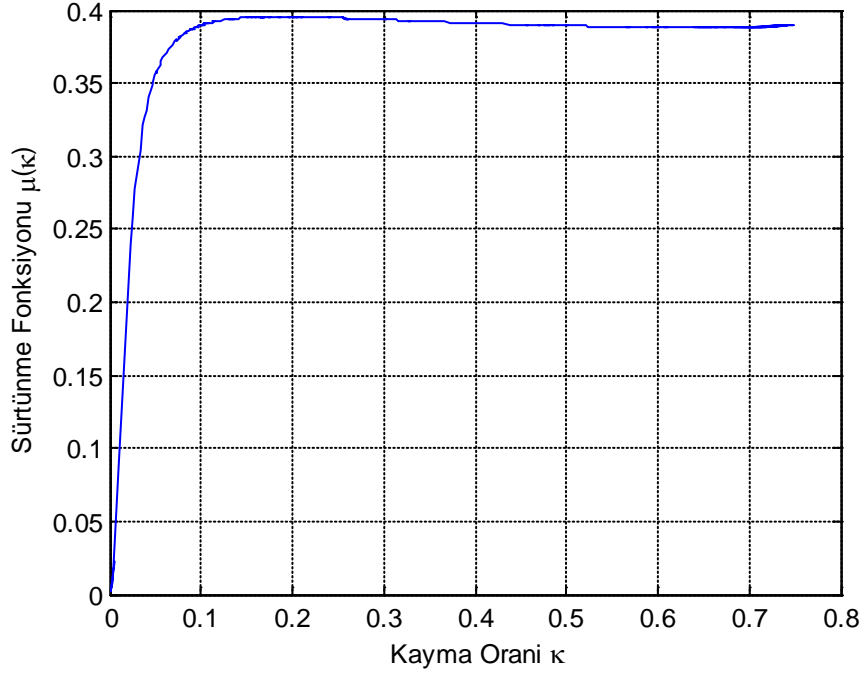


Şekil 20. ABS deney sisteminin simülasyon modelinden okunan değerler ile gözlemleyicinin verdiği değerlerin karşılaştırılması (Kuvvet değerleri)



Şekil 21. ABS deney sisteminin simülasyon modelinden okunan değerler ile gözlemleyicinin verdiği değerlerin karşılaştırılması (Moment değerleri)

Satın alınan ABS deney sisteminde sürtünme fonksiyonu  $\mu(\kappa)$  karakteristiği Şekil 22'de görüldüğü şekilde olmaktadır. Görüldüğü gibi sürtünme fonksiyonunun maksimum değeri, kayma oranı  $\kappa=0.2$  civarında olmaktadır.



Şekil 22. ABS Deney Sisteminde sürtünme fonksiyonu  $\mu$  ile kayma oranı  $\kappa$  'nın değişimi

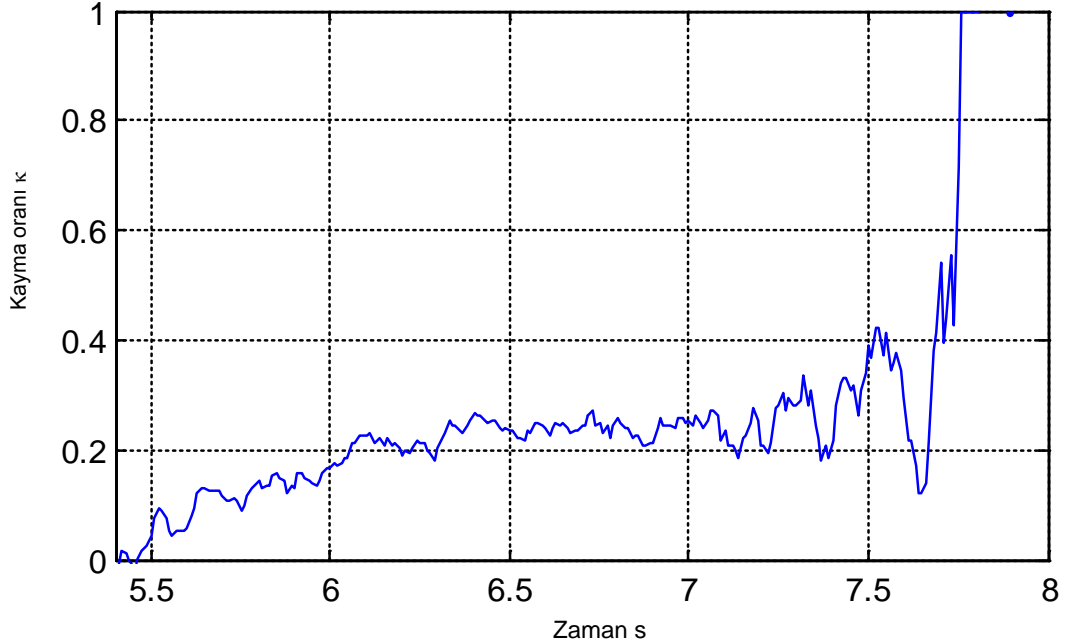
ABS sisteminin simulasyon modeli vasıtasıyla gözlemleyicilerin performansı incelendikten sonra gerçek deney sistemi ile deneylere başlanmıştır. Deney sistemi ile frenleme deneyleri sırasında üst ve alt tekerlek hızlarının değişimi Şekil 23'te görülmektedir. Önce tekerlekler hızlanmaya başlamakta, belli bir hıza ulaştıktan sonra (yaklaşık 5.4 s sonra) alttaki tekerleği tahrik eden elektrik motorunun gücü kesilmekte ve üst tekerlekte frenleme rutini başlamaktadır.





Şekil 23. ABS deney sisteminden ölçülen tekerlek hızları değerleri

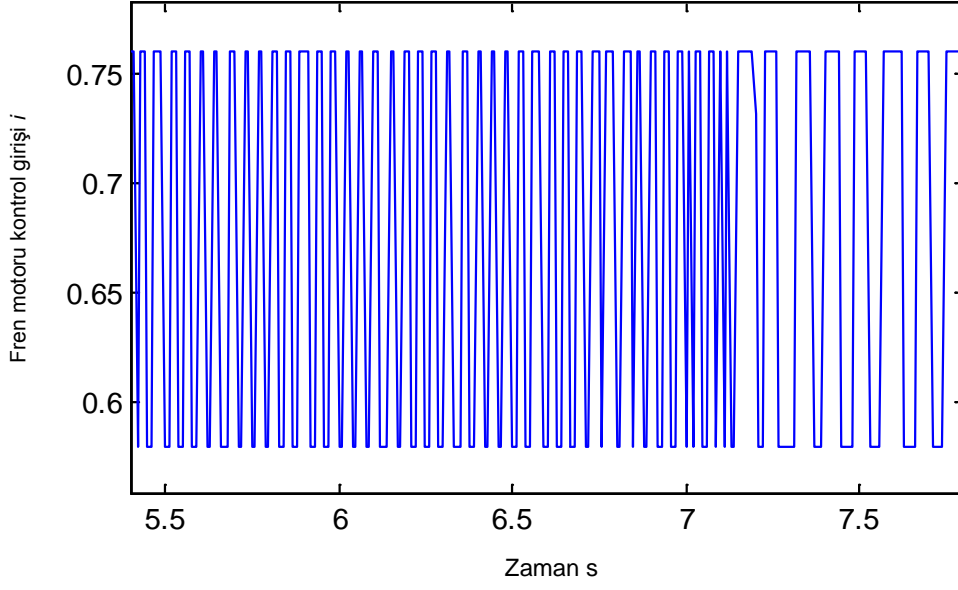
Deney sistemi üzerinde Şekil 14'te görülen kontrol algoritması koşturulduğunda frenleme sırasında kayma oranı değerinin değişimi Şekil 24'te görüldüğü şekilde çıkmıştır.



Şekil 24. Frenleme deneyi sırasında kayma oranı değerinin değişimi

Şekil 24'ten görülmektedir ki ekstremum arama algoritması üst tekerleği sürtünme fonksiyonunun maksimum olduğu  $\kappa=0.2$  civarında tutmaktadır. Frenleme motoru kontrol girişi  $i$  değerleri Şekil 25'te görülmektedir. Frenleme sisteminde fren pedalı mekanizmasındaki

boşluk nedeni ile  $i=0.55$  değerinde frenleme başlamakta,  $i=0.8$  değerini aldığı anda ise tekerlekler kilitlenmektedir. Bu nedenle deneyler sırasında frenleme motorunun  $i$  değerleri 0.58 ile 0.76 arasında olacak şekilde sınırlandırılmıştır.



Şekil 25. Frenleme deneyi sırasında fren motoru kontrol girişi  $i$ 'nin değişimi

## 5. TARTIŞMA/SONUÇ

Bu projede bir uyarlamalı kayma kipli kontrol temelli ekstremum arama algoritması geliştirilmiştir. Arama algoritmasının parametresi uyarlamalı hale getirilerek kontrollu sistemin optimum çalışma noktası etrafındaki davranışının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Sistemin belli bir andaki çalışma noktası optimum bölgeden uzakta ise, uyarlama parametresi büyük seçilerek optimum çalışma bölgesine doğru hızlı yakınsama sağlanmakta, optimum çalışma noktasının yakınına ulaşıldığında ise uyarlama parametresi küçültülerek ekstremum noktası etrafında küçük genlikli salınımlar ile çalışma sağlanmaktadır.

Geliştirilen bu algoritma ABS kontrol problemine uygulanmıştır. Günümüzde taşıtlarda kullanılan ticari ABS sistemleri, frenleme sırasında tekerleklerin dönme hızlarını ölçmekte, tekerleklerin yavaşlama ivmesi belli bir kritik eşik değerini aştığında fren basıncına müdahale ederek tekerleklerin kilitlenme tehlikesi olmadan yavaşlamalarını sağlamaktadır. Bu sistem, kilitlenmeyi önlemekle birlikte tekerleklerin maksimum frenleme potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmamaktadır. Bu süreçteki en önemli zorluk, tekerleklerin farklı yol koşullarında farklı karakteristiklerde davranış göstermesidir. Maksimum frenleme performansını sağlayacak bir ABS algoritması yol koşullarını göz önüne almalı fakat yol koşullarının önceden ölçümü ya da kestiriminin zorluğu, bu amacın önünde bir engel olarak durmaktadır.

Geliştirilen algoritmanın bilgisayar ortamında bir çeyrek araç modeli ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar farklı yol koşullarında gerçekleştirilmiş ve bilinmeyen yol koşullarında maksimum frenlemeyi sağlayacak optimum çalışma noktasının hızlı bir şekilde algoritma tarafından kendi kendine bulunduğu gözlemlenmiştir. Bir diğer sonuç ise frenleme momentinin zamanla değişimi eğrilerinden görülebildiği gibi algoritmanın uyarlamalı hale getirilmesiyle fren momenti değerlerindeki salınımlar önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Bu da fren donanımının ömrünü iyileştirici bir sonuçtur.

Simülasyon çalışmalarının ardından deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Inteco Ltd firmasından satın alınan bir elektromekanik frenleme sistemi deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Kontrol algoritmasının deney sistemine uygulanabilmesi için üst ve alt tekerleklerin açısal hız bilgilerine, tekerlekler arasında oluşan boylamsal kuvvet bilgisine ve üst tekerleğe uygulanan fren torku bilgisine ihtiyaç vardır. Üst ve alt tekerlek hızları sistemdeki enkoderlar vasıtasıyla ölçülebilmektedir. Tekerlek kuvveti ve fren momenti ise sistemden doğrudan ölçülememektedir. Bunun için kuvvet ve moment gözlemleyicileri tasarlanmış, gözlemleyici cevapları deney sisteminin simülasyon modelinden elde edilen kuvvet ve moment cevapları ile karşılaştırılarak performansları analiz edilmiştir. Gözlemleyicilerin doğru sonuçlar verdiği görüldükten sonra geliştirilen kontrol algoritması gerçek deney sistemine uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar ile görülmüştür ki, geliştirilen



kontrol algoritması tekerlekler arasındaki maksimum frenleme kuvvetini sağlayacak optimum kayma oranı değerini önceden bilmemesine rağmen fren sırasında ekstremum noktayı arayarak optimum kayma oranını sağlayacak şekilde frenleme yaptırmakta böylece fren kuvvetlerini maksimize etmektedir. Bu şekilde, geliştirilen algoritmanın gerçek zamanlı olarak gerçek bir sistemde uygulanabilirliği gösterilmiştir.

İleride yapılacak çalışmalarda, içinde gerçek bir araba tekerleği ve gerçek bir hidrolik fren sistemi bulunan daha kapsamlı bir deney düzeneğinin kurulması ve algoritmanın performansının bu test düzeneğinde analiz edilmesi önerilmektedir.

## Kaynaklar

- Bhandari, R., Patil, S., Singh, R. K. 2012. "Surface prediction and control algorithms for anti-lock brake system", *Transportation Research Part C*, 21, 181-195.
- Cabrera, J. A., Ortiz, A., Castillo, J. J., ve Simon, A. 2005. "A fuzzy logic control for antilock braking system integrated in the imma tire test bench", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54, 1937-1949.
- Capra D., Galvagno, E., Leeuwen, B. v., Vigliani, A., Ondrak, V. 2012. "An ABS control logic based on wheel force measurement", *Vehicle System Dynamics*, 50, 1779-1796.
- DeHaan, D., and Guay, M. 2005. "Extremum seeking control of state constrained nonlinear systems", *Automatica*, 41, 1567-1574.
- Dincmen, E., and Guvenc, B. A. 2012. "A control strategy for parallel hybrid electric vehicles based on extremum seeking", *Vehicle System Dynamics*, 50, 199-227.
- Dincmen, E., Guvenc, B. A., and Acarman, T. 2014. "Extremum seeking control of ABS braking in road vehicles with lateral force improvement", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22, 230-237.
- Dincmen, E. 2014. "Adaptive Extremum Seeking Scheme for ABS Control", 13th International Workshop on Variable Structure Systems VSS., Nantes-France.
- Drakunov, S. 1993. "Sliding mode control of the systems with uncertain direction of control vector", *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, 2477-2478.
- Drakunov, S., Ozguner, U., Dix, P., ve Ashrafi, B. 1995. "ABS control using optimum search via sliding modes", *IEEE Transactions on Control Systems and Technology*, 3, 79-85.
- Guay, M., and Zhang, T. 2003. "Adaptive extremum seeking control of nonlinear dynamic systems with parametric uncertainties", *Automatica*, 39, 1283-1293.
- Harifi, A., Aghagolzadeh, A., Alizadeh, G., Sadeghi, ve M. 2008. "Designing a sliding mode controller for slip control of antilock brake systems", *Transportation Research Part C*, 16, 731-741.
- Haskara, I., Ozguner, U., Winkelman, J. 2000. "Wheel slip control for antispin acceleration via dynamic spark advance", *Control Engineering Practice*, 8, 1135-1148.
- Haskara, I., Ozguner, U., ve Winkelman, J. 2000. "Extremum control for optimal operating point determination and set point optimization via sliding modes", *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 122, 719-724.
- Jing, H., Liu, Z., ve Chen, H. 2011. "A switched control strategy for antilock braking system with on/off valves", *IEEE Trans. Vehicle Tech.*, 60, 1470-1484.
- Kayacan, E., Oniz, Y. ve Kaynak, O. 2009. "A grey system modeling approach for sliding-mode control of antilock breaking system", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 56, 3244-3252.
- Korovin, S. K., ve Utkin, V. I. 1974. "Using sliding modes in static optimization and nonlinear programming", *Automatica*, 10, 525-532.
- Krstic, M., ve Wang, H.H. 2000. "Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems", *Automatica*, 36, 595-601.
- Lin, C.-H. ve Li, H.-Y. 2013. "Intelligent hybrid control system design for antilock braking systems using self-organizing function-link fuzzy cerebellar model articulation controller", *IEEE Trans. Fuzzy Sys.*, 21, 1044-1055.

- Mitić, D. B., Perić, S. Lj., Antić, D. S., Jovanović, Z. D., Milojković, M. T. ve Nikolić, S. S. 2013. "Digital sliding mode control of anti-lock braking system", *Adv. Elec. Comp. Eng.*, 13, 33–40.
- Mirzaeinejad, H., ve Mirzaei, M. 2010. "A novel method for non-linear control of wheel slip in anti-lock braking systems", *Control Engineering Practice*, 18, 918-926.
- Pacejka, H. B. 2002. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Patel, N., Edwards, C., ve Spurgeon, S. 2007. "Optimal braking and estimation of tyre friction in automotive vehicles using sliding modes", *International Journal of Systems Science*, 38, 901–912.
- Popovic, D., Jankovic, M., Magner, S., ve Teel, A.R. 2006. "Extremum seeking methods for optimization of variable cam timing engine operation", *IEEE Transactions on Control Systems and Technology*, 14, 398–407.
- Rattasiri, W., Wickramarachchi, N., ve Halgamuge, S. K. 2007. "An optimized anti-lock braking system in the presence of multiple road surface types", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 21, 477–498.
- Sharkawy, A. B. 2010. "Genetic fuzzy self-tuning PID controllers for antilock braking systems", *Eng. App. Artif. Int.*, 23, 1041–1052.
- Tanelli, M., Savaresi, S., ve Cantoni, C. 2006. "Longitudinal vehicle speed estimation for traction and braking control systems", *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications*, 2790–2795.
- Tanelli, M., Astolfi, A., ve Savaresi, S. 2008. "Robust nonlinear output feedback control for brake by wire control systems", *Automatica*, 44, 1078-1087.
- Zhang, C., ve Ordonez, R. 2007. "Numerical optimization-based extremum seeking control with application to ABS design", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52, 454-467.
- Zhang, C., Siranosian, A., ve Krstic, M. 2007. "Extremum seeking for moderately unstable systems and for autonomous vehicle target tracking without position measurements", *Automatica*, 43, 1832–1839.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proje Yürütücüsü:                       | Yrd. Doç. Dr. ERKİN DİNÇMEN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Proje No:                               | 112E267                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Proje Başlığı:                          | Optimal Abs Frenleme Kontrolcüsünün Geliştirilmesi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Proje Türü:                             | 3501 - Kariyer                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Proje Süresi:                           | 24                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Araştırmacılar:                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Danışmanlar:                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: | IŞIK Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ B.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:  | 01/04/2013 - 01/04/2015                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Onaylanan Bütçe:                        | 102030.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Harcanan Bütçe:                         | 58651.82                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Öz:                                     | <p>Günümüzde taşıtlarda kullanılan ticari ABS sistemleri, frenleme sırasında tekerleklerin dönme hızlarını ölçmekte, tekerleklerin yavaşlama ivmesi belli bir kritik eşik değerini aştığında fren basıncına müdahale ederek tekerleklerin kilitleme tehlikesi olmadan yavaşlamalarını sağlamaktadır. Bu sistem, kilitlenmeyi önlemekle birlikte tekerleklerin maksimum frenleme potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmamaktadır. Frenleme performansını iyileştirecek çeşitli ABS algoritmaları akademik düzeyde geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu süreçteki en önemli zorluk, tekerleklerin farklı yol koşullarında farklı karakteristiklerde davranış göstermesidir. Maksimum frenleme performansını sağlayacak bir ABS algoritması yol koşullarını göz önüne almalı fakat yol koşullarının önceden ölçümü ya da kestiriminin zorluğu, bu amacın önünde bir engel olarak durmaktadır.</p> <p>Bu projede, yol koşulları bilgisine ihtiyaç duymadan optimum frenleme performansını sağlayan bir ABS kontrol algoritması geliştirilmiş ve bu algoritma deneysel bir sisteme uygulanmıştır. Geliştirilen algoritmanın temeli literatürde Ekstremum Arama Algoritması (EAA) olarak adlandırılan yöntemdir. Bu algoritma, bir sistemin optimum çalışma noktasının önceden bilinmediği durumlarda kullanılabilir. Örneğin acil durum frenlemesinde ihtiyaç duyulduğu gibi bilinmeyen yol koşullarında tekerlek ile yol arasındaki frenleme kuvvetlerinin maksimize edilmesi problemi EAA'nın uygulama alanına girmektedir.</p> <p>Projede EAA temelli bir ABS kontrol algoritması geliştirilmiştir. Literatüre getirilen bir yenilik olarak, arama algoritmasında kullanılan parametreler uyarlamalı hale getirilerek Uyarlamalı Ekstremum Arama Algoritması tabanlı ABS kontrolcüsü geliştirilmiştir. Bu şekilde algoritmanın hızlı bir şekilde optimum çalışma noktasını bulması, bulduktan sonra ise parametrelerin uyarlanarak optimum nokta etrafında düşük genlikli salınımlar ile frenleme performansının önemli ölçüde iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca literatürde önerilen ABS kontrol algoritmalarının hemen hemen hepsi sadece bilgisayarda gerçekleştirilen simülasyonlar ile doğrulanmakta, gerçek bir sistemde gerçek zamanlı uygulanabilirlikleri soru işareti olarak kalmaktadır. Bu projede bir ABS deney düzeneği satın alınmış ve algoritmanın gerçek zamanlı testleri gerçekleştirilmiştir.</p> |
| Anahtar Kelimeler:                      | ABS Frenleme Kontrolcüsü, Ekstremum Arama Algoritması, Kendi Kendine Optimizasyon                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:  | Hayır                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Projeden Yapılan Yayınlar:              | 1- Adaptive Extremum Seeking Scheme for ABS Control (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |