

**GÜÇ TAKVİYELİ DİREKSİYON SİSTEMLERİNİN
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Alper SARIKAYA
(518021011)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Levent GÜVENÇ

Diğer Jüri Üyeleri Öğr. Gör. Dr. Erdinç Altuğ

Y.Doç.Dr. Ümit Sönmez

OCAK 2007

ÖNSÖZ

Yönlendirme sistemleri, aracın kontrolünün sağlanması ve güvenli sürüş açısından çok önemlidir. Yeni nesil araçlarda elektrikli güç takviyeli yönlendirme sistemleri (EPS) sıkça karşımıza çıkmaktadır. EPS sistemleri aracılığıyla sürücüye, direksiyonu döndürme hareketi sırasında yardımcı olunmaktadır. Bir elektrik motoru yardımıyla sürücünün daha az moment uygulayarak aracı kontrol etmesi sağlanmaktadır. Bu çalışmada, yol taşıtı yönlendirme sistemleri incelenerek birbirleri ile karşılaştırılmış, güç takviyeli yönlendirme sistemlerinin avantajları açıklanmıştır. Ayrıca EPS modeli oluşturulmuş ve model için kontrolcü tasarlanarak performansı simülasyonlarla test edilmiştir.

Çalışmamın her aşamasında verdiği destek ve yaptığı katkılar için Sayın Hocam Prof. Dr. Levent GÜVENÇ'e, bu süreç boyunca yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen nişanlım Elif KURT'a teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2006

Alper SARIKAYA

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	1
1.2. Literatürde Elektrikli Güç Takviyeli Yönlendirme Sistemleri	2
2. YOL TAŞITI YÖNLENDİRME SİSTEMLERİ	5
2.1. Mekanik Sistemler	5
2.1.1. Taşıtlarda dönme kinematiği	7
2.1.2. Kanber açısı	9
2.1.3. Toe açısı	9
2.1.4. Kaster açısı	10
2.2. Güç Takviyeli Yönlendirme Sistemleri	11
2.2.1. Hidrolik yönlendirme sistemleri	11
2.2.2. Elektro hidrolik yönlendirme sistemleri	13
2.2.3. Elektrikli güç takviyeli yönlendirme sistemleri	16
2.3. Elektronik Direksiyon	17
3. EPS MATEMATİK MODEL	21
3.1. EPS Modelinin Alt Bölümleri	23
3.1.1. Direksiyon modeli	23
3.1.2. Elektrik motoru modeli	24
3.2. Takviye Eğrisi	26
4. KONTROL	30
4.1. Kontrol Tasarım Amaçları	30
4.2. Durum Uzay Modeli	32
4.3. Durum Geribeslemesi İle Kutup Yerleştirme	34
4.4. Kontrolcü Tasarımı	38
4.5. Gözlemci Tasarımı	42
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI	44
5.1. Güç Takviyesiz Sistem Cevapları	44
5.2. Güç Takviyeli Sistem Cevapları	45
5.3. Farklı Hızlarda Güç Takviyesi	47

5.4. Şerit Değişirme Manevrası	49
5.5. Gözlemci Performansının İncelenmesi	50
6. SONUÇLAR	52
KAYNAKLAR	53
EKLER	55
ÖZGEÇMİŞ	56

KISALTMALAR

ECU	: Electronic Control Unit
EPAS	: Electric Power Assisted Steering
EPS	: Electric Power Steering
EHPS	: Electro-Hydraulic Power Steering
MIMO	: Multi Input-Multi Output
LQR	: Linear Quadratic Regulator

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Hidrolik güç takviyeli yönlendirme sistemlerine ait örnek değerler	13
Tablo 2.2 : Avrupa yapımı araçlara ait EHPS örnekleri.....	15
Tablo 4.1 : Model parametreleri.....	35
Tablo A.1 : Modelde kullanılan katsayılar ve semboller.....	55

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Kremayer Mekanizmalı Yönlendirme Sistemi.....	6
Şekil 2.2 : Farklı Direksiyon Oranlarının Uygulanması.....	6
Şekil 2.3 : Sonsuz Vida Mekanizması.....	7
Şekil 2.4 : Sonsuz Vidalı Dişli Kutusu Yönlendirme Mekanizması.....	7
Şekil 2.5 : Ackerman Dönme Geometrisi.....	8
Şekil 2.6 : Ackermann Geometrisini Sağlayan Basit Yapılar.....	8
Şekil 2.7 : Pozitif ve Negatif Kanber Açıları.....	9
Şekil 2.8 : Sırası İle Toe-In ve Toe-Out Açıları.....	10
Şekil 2.9 : Kaster Açısı.....	10
Şekil 2.10 : Hidrolik Güç Takviyeli Yönlendirme Sistemi.....	11
Şekil 2.11 : Hidrolik Yönlendirme Sistem Ekipmanları.....	12
Şekil 2.12 : Pinyon, Doğrusal Dişli ve Hidrolik Silindir Şematik Resmi.....	13
Şekil 2.13 : Elektro Hidrolik Yönlendirme Sistemi.....	14
Şekil 2.14 : EHPS Sistem Ekipmanları.....	14
Şekil 2.15 : Çeşitli EPS Sistemleri.....	17
Şekil 2.16 : Elektronik Direksiyon.....	18
Şekil 2.17 : Hidrolik Yedekli Elektronik Direksiyon.....	19
Şekil 2.18 : Yolcu Araçlarında Yıllara Göre Güç Kullanım Dağılımı.....	19
Şekil 3.1 : Çift Pinyonlu EPS Sistemi Şematik Gösterimi.....	21
Şekil 3.2 : Direksiyon Modeli.....	24
Şekil 3.3 : Elektrik Motoru Modeli.....	25
Şekil 3.4 : EPS Modeli.....	26
Şekil 3.5 : Takviye Eğrili EPS Sistemi.....	27
Şekil 3.6 : EPS Örnek Güç Eğrisi.....	27
Şekil 3.7 : Park Manevraları ve Düşük Hızlarda Hidrolik Takviye Eğrisi.....	28
Şekil 3.8 : Ortalama Hızlarda Hidrolik Takviye Eğrisi.....	29
Şekil 3.9 : Yüksek Hızlarda Hidrolik Takviye Eğrisi.....	29
Şekil 4.1 : X_r/T_d Frekans Cevabı.....	30
Şekil 4.2 : θ_c/T_d Frekans Cevabı.....	31
Şekil 4.3 : θ_c/F_t Frekans Cevabı.....	32
Şekil 4.4 : İki Girişli, Tek Çıkışlı EPS Sistemi.....	33
Şekil 4.5 : Kutup Yerleştirme Tekniğine Ait Entegratörsüz Bir Model İçin Blok Diyagramı.....	37
Şekil 4.6 : Kutup Yerleştirme Tekniği ile EPS İçin Blok Diyagramı.....	39
Şekil 4.7 : Gerçek Sistem İle İkinci Dereceden Sistemin Normalize Edilmiş Birim Basamak Cevabı.....	40
Şekil 4.8 : Zaman Tanım Kriterleri.....	41
Şekil 4.9 : EPS Modeli İçin Gözlemci Tasarımı.....	43
Şekil 5.1 : Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi.....	44
Şekil 5.2 : Direksiyon Mili Açısıl Konumu.....	45

Şekil 5.3 :	Sisteme Uygulanan Giriş Değerleri.....	45
Şekil 5.4 :	Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi.....	46
Şekil 5.5 :	Direksiyon Mili Açısal Konumu.....	46
Şekil 5.6 :	Farklı Hızlar İçin Sisteme Uygulanan Güç Takviyesi Değerleri.....	47
Şekil 5.7 :	Aynı Direksiyon Giriş Değeri İçin Farklı Hızlarda Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi Değerleri.....	48
Şekil 5.8 :	Aynı Direksiyon Giriş Değeri İçin Farklı Hızlarda Direksiyon Mili Açısal Konumu.....	48
Şekil 5.9 :	Sisteme Uygulanan Güç Takviyesi Değerleri.....	49
Şekil 5.10 :	Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi.....	50
Şekil 5.11 :	Direksiyon Mili Açısal Konumu.....	50
Şekil 5.12 :	Normalize Edilmiş Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi.....	51
Şekil 5.13 :	Normalize Edilmiş Direksiyon Çubuğu Hızı	51

SEMBOL LİSTESİ

T_d	: Sürücü tarafından uygulanan tork
T_m	: Elektrik motorunun oluşturduğu tork
θ_c	: Direksiyon mili açısal konumu
x_r	: Direksiyon çubuğu yer değişimi
θ_m	: Motor mili açısal konumu
i	: Motor akımı
v	: Motor kontrol gerilimi
J_c	: Direksiyon mili atalet momenti
K_c	: Direksiyon mili burulma katsayısı
B_c	: Direksiyon mili sönüm katsayısı
M_r	: Direksiyon çubuğu kütlesi
B_r	: Direksiyon çubuğu sönüm katsayısı
K_t	: Direksiyon çubuğu yay katsayısı
r_p	: Pinyon yarıçapı
G	: Motor dişli oranı
J_m	: Motor atalet momenti
K_m	: Motor ve dişli kutusu burulma katsayısı
B_m	: Motor ve dişli kutusu sönüm katsayısı
K	: Motor tork ve gerilim katsayısı
L	: Motor indüktansı
R	: Motor direnci

GÜÇ TAKVİYELİ DİREKSİYON SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

ÖZET

Yönlendirme sistemleri, aracın kontrolünün sağlanması ve güvenli sürüş açısından çok önemlidir. Günümüzde halen mekanik yönlendirme sistemlerine sahip bir çok araç kullanılmaktadır. Ortak problem, özellikle düşük hızlarda ya da park manevralarında, tekerleklerle gelen yan kuvvetlerden kaynaklanan tepki momentinin aşılması için büyük kuvvet ihtiyacıdır. Bu kuvvetin aşılması için mekanik çözümler arandığı gibi, sisteme ek yapılar katılarak sürücüye yardımcı sistemler de oluşturulur. Bu sistemlere genel olarak güç takviyeli sistemler denilmektedir.

Hidrolik güç takviyeli sistemler bunların en başında gelir. Gerekli gücün bir kısmı hidrolik sistem vasıtası ile sağlanmakta ve sürücüye yardımcı olunmaktadır. Yönlendirme sisteminde bulunan güç takviye bileşenlerinin kaldırılarak, güç takviyesinin elektrik motoru ile sağlanmasıyla da elektrikli güç takviyeli yönlendirme sistemleri ortaya çıkmıştır. EPS sistemleri aracılığıyla sürücüye, direksiyonu döndürme hareketi sırasında yardımcı olunmaktadır. Bir elektrik motoru yardımıyla sürücü tarafından sisteme uygulanan moment arttırılarak sürücünün daha az bir moment uygulayarak aracı kontrol etmesi sağlanmaktadır. EPAS veya EPS isimleri ile anılan bu sistem yeni nesil araçlarda sıkça karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, yönlendirme sistemlerinin incelenmesi ve birbirleri ile karşılaştırılmasının yanı sıra, elektrikli güç takviyeli yönlendirme sistemi matematik modeli oluşturulmuştur. Sistemin dinamik davranışı incelenerek kutup yerleştirme yöntemi ile kontrolcü tasarlanmıştır. Simulink programında oluşturulan model üzerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda EPS sistemi sayesinde sürücüye yardımcı kuvvet miktarları incelenmiş, sürücünün direksiyonu yumuşak ya da sert olarak algılamasını sağlayan kontrol incelenmiştir.

MODELLING AND CONTROL OF POWER ASSISTED STEERING SYSTEMS

SUMMARY

Steering systems have a very important role on vehicle control and safe driving. Today, there are still lots of vehicles which have a mechanical steering system. The main problem is that a high amount of torque is needed to turn the steering wheels. Power assisted steering systems are used to solve this problem.

Hydraulic power assisted steering systems are the most common types of power assisted steering systems. Assisted torque is obtained from the hydraulic actuator. By eliminating hydraulic components from the steering system and adding an electrical motor for assisted power an EPS system is obtained. EPS systems provide power assistance to drivers with an electric motor. By the help of this assistance, drivers can control the steering wheel with less power. EPAS or EPS systems are becoming popular in new generation cars

In this study, the analysis of steering systems and their comparison has been made and also the mathematical model of an electric steering system has been prepared. The dynamic behaviour of the system was analysed and a pole placement controller was designed. The model of the systems built in the Simulink program, was used in simulations. In these simulations, the issues of how much power assist is added to the system and the steering system compliance are discussed.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Güvenlik, konfor ve ekonomi yeni nesil araçlarda üzerinde en çok durulan konular arasında bulunmaktadır. Aracın ve yolcuların güvenliğini sağlamak için bir çok yeni sistemler geliştirilmiştir. Yönlendirme sistemleri, aracın kontrolünün sağlanması ve güvenli sürüş açısından çok önemlidir. Sürüş sırasında meydana gelebilecek bir arıza, beraberinde birçok mal ve daha da önemlisi de can kayıplarını beraberinde getirebilir.

Yol taşıtı yönlendirme sistemlerinde, düşük hızlarda ya da park manevralarında tekerleklerle gelen yan kuvvetlerden kaynaklanan tepki momentinin aşılması için büyük kuvvetlere ihtiyaç vardır. Bu kuvvetin aşılması için mekanik çözümler arandığı gibi, sisteme ek yapılar katılarak sürücüye yardımcı sistemler de oluşturulmuştur. Bu sistemlere genel olarak güç takviyeli yönlendirme sistemleri denilmektedir.

Elektrikli güç takviyeli yönlendirme sistemleri (EPS) yeni nesil araçlarda sıkça karşımıza çıkmaktadır. EPS sistemleri aracılığıyla sürücüye, direksiyonu döndürme hareketi sırasında yardımcı olunmaktadır. Bir elektrik motoru yardımıyla sürücü tarafından sisteme uygulanan moment arttırılarak sürücünün daha az bir moment uygulayarak aracı kontrol etmesi sağlanmaktadır.

Bu tezde, öncelikle yol taşıtı yönlendirme sistemleri incelenip birbirleri ile karşılaştırılmış, güç takviyeli yönlendirme sistemlerinin avantajları açıklanmıştır. Daha sonra elektrikli güç yönlendirme sistemlerinin matematik model denklemleri elde edilmiş ve Matlab Simulink programı kullanılarak EPS modeli oluşturulmuştur. Sonraki bölümde, kontrol tasarım amaçları incelenerek, kutup yerleştirme metodu ile EPS modelinin kontrol edilmesi sağlanmıştır. Ardından oluşturulan modelde simülasyon gerçekleştirilmiş ve son bölümde sonuçlar tartışılmıştır.

1.2 Literatürde Elektrikli Güç Takviyeli Yönlendirme Sistemleri

Zaremba ve Davis [1], güç takviyeli yönlendirme sistemlerini sistem kararlılığı yönünden ele almaktadır. Çalışmada çift pinyon tipli güç takviyeli yönlendirme sistemi modellenmiştir. Güç takviyesini ve yönlendirmeyi ifade eden takviye güç/direksiyon mili tork değeri ve direksiyon açısı/sürücü tork değeri transfer fonksiyonları analitik olarak elde edilmiştir. Aktüatörün takviye koşullarını ve düzeyini belirlemek için park anındaki koşullar, yüksek süratte rastgele sürüş koşullarında en kötü hal tasarımı olarak dikkate alınmıştır. Yüksek miktarda uygulanan güç takviyesinin sistemi kararsızlık sınırına taşıyabileceği ve fiziksel olarak direksiyon milinde istenmeyen titreşimlere sebep olabileceği, bunun da araç performansını olumsuz etkileyeceği gösterilmiştir. Kararlılık yeterlilik koşulları takviyeli yönlendirmenin kritik parametreleri olarak kararlılık sınırını tarif eden doğrusal olmayan denklem takımlarının çözümünden elde edilmiştir. Kararlılık sınırını gösteren ve takviye sistemi tarafından hesaplanan yaklaşık bir maksimum tork değeri analitik olarak elde edilmiştir.

Zaremba, Liubakka ve Stuntz [2] ve [3]'de sistem doğrudan tork kuvvetlendirici olarak düşünülmüş, kararlılığı sağlamak ve gürültünün azaltılması için gerekli denetim seviyesi kontrol tasarım problemi olarak ele alınmıştır. Doğal olarak doğrusal olmayan bir sistem olmasına rağmen, belirli bir çalışma aralığında doğrusal kabul edilmiş ve elde edilen sonuçların gerçek değere tatmin edici ölçüde yakın olduğu görülmüştür. EPAS için iki ayrı dinamik denetim modeli öngörülmüştür. Bunlardan birincisi aktüatörün yüksek frekanslı bileşenlerinde yönlendirme sisteminin fiziksel özelliklerini kullanmaktadır ve daha iyi yönlendirme hissine sahiptir ancak performans açısından beklenen sonuçlar elde edilememiştir. Bu metodun sisteme ilave olarak bir çok sensör bağlanmasını gerektirmesi maliyet yönünden de başka bir dezavantaj oluşturmaktadır. İkinci model ise düşük frekanslı bileşenleri içermektedir ve daha kararlı, dayanıklı sonuçlar vermektedir.

Badawy ve diğerlerine ait çalışmada [4], güç destekli yönlendirme sisteminin açıklanması amaçlanmıştır. Dinamik sistemin modellenmesi, basitlik ve kullanım kolaylığı ilkeleri gözönünde bulundurularak oluşturulmuştur. Sistemin ayırt edici özelliklerini ortaya çıkaran basit bir model kendinden daha karmaşık bir modelden elde edilmiştir. Bu model tork performansı, bozucu engellenmesi, gürültü

engellenmesi, yoldan gelen tepki kuvvetlerinin sürücüye iletimi ve kararlılık gibi kapalı çevrim kriterlerini analiz etmek için kullanılmaktadır. İstenen kontrol sistemini oluşturmak için bu temel kriterleri değerlendirmek önem arz etmektedir.

Chabaan ve Wang [5], H_∞ metoduna başvurarak elektrik güç takviyeli yönlendirme sisteminin - EPAS, performansının arttırılması ve dayanıklı bir sistem geliştirilmesi için kontrolör tasarlamışlardır. Bu çalışmada örnek alınan EPAS sistemi doğrusal olmayan terimler içeren çok girişli çok çıkışlı bir sistemdir. EPAS sisteminde sürücü tork komutuna hızlı cevap verilir. Sistem yapıdan gelen tepki kuvvetlerinin sürücü tarafından daha çok hissedilmesi ve karşı yük ve sensör gürültülerinin azaltılması özelliklerine sahiptir. Bu çalışmada kullanılan EPAS sistemindeki doğrusal olmayan bileşenler yüzünden doğrusallaştırılmış modelde hatalar ve dış bozucular barındırmaktadır. Bu çalışmada güç eğrisi olarak adlandırılan ileri beslemeli kontrol stratejisi kullanılarak sürekli dayanıklılık sağlamak amaçlanmıştır. Sürücünün uyguladığı tork değerlerini ölçmenin maliyetli olacağı düşünülerek araçtan ölçülen diğer sinyallerden faydalanarak torku hesaplayan bir ifade kullanılmıştır. Bu ifadenin eklenmesi sistemin kapalı çevrimine dayanıklı performansı etkileyen bir alt çevrim daha eklenmesine sebep olmuştur. Kontrolcüler hem doğrusal olmayan hem de doğrusallaştırılmış modeller üzerinde simülasyon yapmak yoluyla değerlendirilmiş ve araçtan toplanan test verileriyle sağlamaları yapılmıştır.

Parmar ve Hung [6] ve [7]'deki çalışmalarında çift pinyonlu elektrikli güç destekli yönlendirme sisteminin tasarımı ve analizini incelemişlerdir. Gelişmiş yönlendirme elektrik motor sisteminin basitleştirilmiş modeli Lagrange denklemlerinden elde edilmiştir. Çalışmada ilk olarak giriş-çıkış modelinin yerine durum-uzay modelleme yöntemi kullanılmıştır. Sistem modeli için gerekli olan durum-uzay denklemleri motor mili açısal pozisyonu ve direksiyon mili tork değerlerinin çıkış olarak kullanılmasıyla elde edilmiştir. İkinci olarak EPAS sistemi için optimal kontrolcü olarak LQR (linear quadratic regulator) ve Kalman filtre teknikleri kullanılmıştır. LQR ve Kalman filtresi tasarımı ağırlıklarının seçimi değerlendirilmiştir. Son olarak, yönlendirme sistemi tork sensörüne gerek duymayan kontrol stratejisi ve EPAS kontrolcü tasarımıdaki kritik bileşenler sunulmuştur. Önerilen kontrol stratejisi EPAS sistem performansının gelişmesine olanak vermektedir, aynı zamanda da sistem maliyetini ve karmaşıklığını azaltmaya imkan sağlamaktadır.

Güvenç, Ersolmaz, Öncü, Öztürk, Çetin, Kılıç, Güngör ve Kanbolat [8], çalışmasında hafif ticari araçlarda savrulma kontrolü ve elektrikli güç yönlendirme sistemlerinin uygulanmasını içermektedir. Aktif yönlendirme sistemi her iki amaç içinde kullanılmıştır. Araç dinamik modeli ve yönlendirme sistem modeli Simulink programında oluşturularak Adams programındaki geçerli model ile karşılaştırılmış ve simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Çift pinyonlu elektrikli güç yönlendirme test düzeneği üzerinde hardware in the loop simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca EPS sistemi aracılığıyla sisteme ne kadar güç eklendiğini bulmak için x_r/T_d transfer fonksiyonunu incelemek gerektiği ifade edilmiştir. Modelde sürücü girişi T_d ile direksiyon çıkışının konumunda x_r ile ifade edilmektedir. Direksiyonun yumuşak ya da sert olarak algılanması; sürücünün uyguladığı tork değeri T_d 'ye karşılık olarak direksiyonun ne kadar açısal konum θ_c değiştirdiği ile ilgilidir. Sürücüye, yol ve tekerleklerden gelen kuvvetlerin toplamı olan F_t 'nin direksiyonun açısal konumu olan θ_c 'yi ne kadar etkilediği önemlidir. θ_c/F_t transfer fonksiyonu yoldan gelen kuvvetlerin ne kadarının filtre edildiğini, ne kadarının sürücüye aktarıldığını ifade eder.

2. YOL TAŞITI YÖNLENDİRME SİSTEMLERİ

İlk otomobilden itibaren, araçlara yön vermek için kullanılan sistemler günümüze kadar birçok değişimden geçerek gelmiştir. Eskiden kullanılan basit yönlendirme sistemlerinin yerini çok daha karmaşık ve sürücünün kullanımını kolaylaştıran sistemler almıştır. Geçmişten bugüne araçlardaki değişim ve gelişimin neticesi olarak araçlar ağırlaşmış, hızlarında ve performanslarında önemli ölçüde artışlar olmuştur. Bunun sonucu olarak da yönlendirme sistemlerinin kontrolü zorlaşmıştır. Kontrolü kolaylaştırmak için ilk olarak direksiyon simidi büyütülmüştür fakat bu direksiyon simidi yüksek hızlarda sürücüye çok düşük bir performans sağlamıştır. Bundan sonra yönlendirme sistemlerinde farklı mekanizmalar kullanılarak araç kontrolünün kolay bir şekilde sağlanmasına çalışılmıştır.

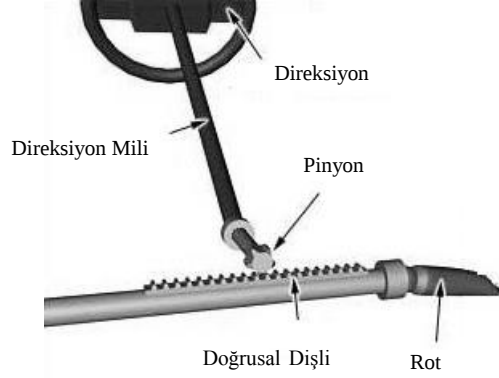
2.1 Mekanik Sistemler

Sürücü tarafından oluşturulan yönlendirme hareketleri direksiyon simidi, direksiyon mili, direksiyon dişli kutusu ve direksiyon bağlantı kolu ile tekerleklerle iletilmektedir.

Yönlendirme teknolojisinde karşımıza birçok mekanik tasarım ortaya çıkmaktadır. Bunların içinde kremayer mekanizması en yaygın yönlendirme sistemlerinden biridir. Bu sistem daha çok hafif araçlarda kullanılmaktadır. Pinyon ve kremayerden oluşan mekanizmada, direksiyondan gelen dönme hareketi doğrusal harekete dönüştürülür. Doğrusal dişli, bağlantı elemanı rot ile tekerlekleri döndüren yönlendirme koluna bağlıdır.

Bir çok araçta, direksiyonun üç ya da dört tam tur döndürülmesiyle tekerleklerin en uç iki açısız konum arasında dönmesi sağlanmış olunur. Direksiyon dönüş açısıyla, tekerleklerin dönüş açısının oranı bize dönme oranını verir. Direksiyon bir tam tur çevrildiğinde (360°), tekerleklerde buna karşılık olarak 20°'lik bir dönüş oluyorsa direksiyon döndürme oranının 18:1 olduğu söyleyenebilir. Oranın artması, aynı

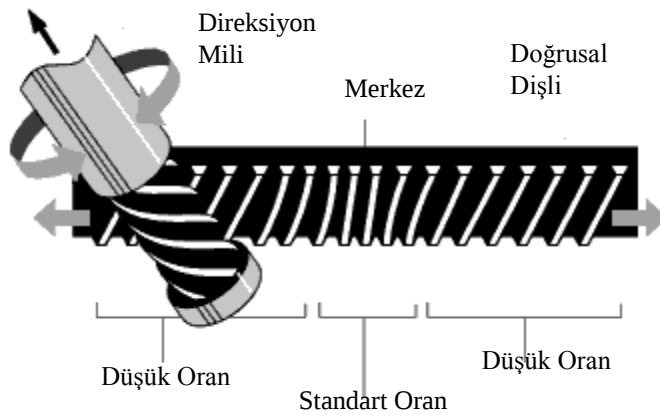
tekerlek açısını elde edebilmek için direksiyonu daha çok çevrilmesi gerektiği anlamına gelir. Bunun yanında yüksek direksiyon döndürme oranları daha düşük bir sürücü torku kullanımına imkan verir [9].



Şekil 2.1 : Kremayer Mekanizmalı Yönlendirme Sistemi [10]

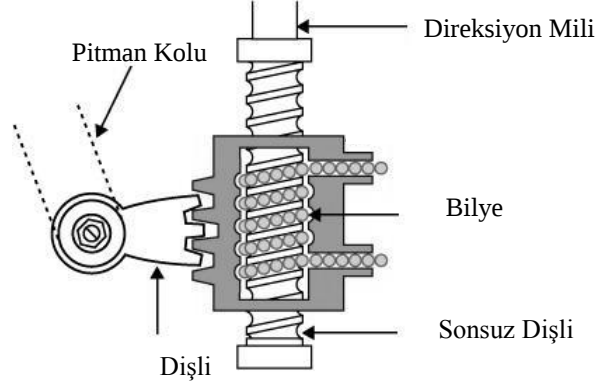
Genelde spor arabalarında döndürme oranı küçük seçilir. Böylece küçük direksiyon hareketleriyle araç kontrol edilebilir fakat bu durumda direksiyonu çevirmek için uygulanması gereken kuvvet de artar.

Bazı yönlendirme sistemli araçlar değişken döndürme oranlarına sahip olabilirler. Bu durum doğrusal dişli üzerindeki diş aralıklarının bölgesel olarak değişim göstermesiyle elde edilir. Şekil 2.2'deki kremayerin merkezindeki döndürme oranı, kenarlara doğru diş aralıklarının arttırılması ile azalmaktadır. Bu şekilde orta konumda hassas bir direksiyon sağlanırken park manevralarında sürücü hareketi büyümüş olsa da, sürücünün büyük kuvvetler uygulaması önlenmiş olacaktır [11].



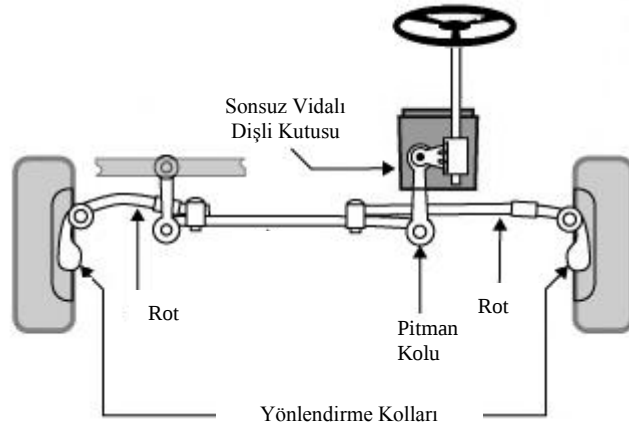
Şekil 2.2 : Farklı Direksiyon Oranlarının Uygulanması [11]

Yaygın olarak kullanılan diğ er bir dişli kutusu da döner bilyeli dişli kutusudur. Bu mekanizmalarda b utt un çarkın gerçekleştirilmesi gereksiz olup bir veya iki dişin olması yeterlidir. Bu sistem kamyon ve bazı hafif araçlarda kullanılmaktadır.



şekil 2.3 : Sonsuz Vida Mekanizması [10]

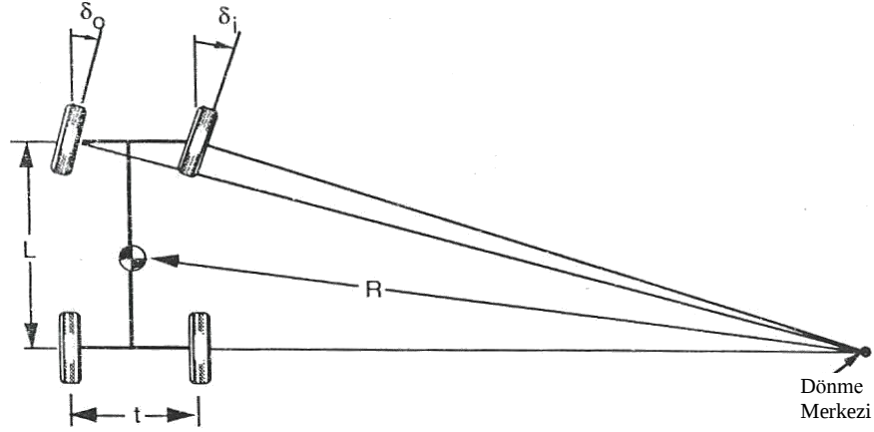
Sistemde direksiyon, direksiyon mili ile dişli kutusuna bağlanmıştır. Bu dişli kutusu da pitman kolu ile rotlara bağlanmıştır. Rot ise direksiyon bağlantı kolu ile tekerleklerle bağlıdır. Pitman kolu direksiyon hareketine göre sağa ve sola hareket eder ve b oyele sol ve sağ  n tekerler hareket eder [4].



şekil 2.4 : Sonsuz Vidalı Dişli Kutusu Yönlendirme Mekanizması [10]

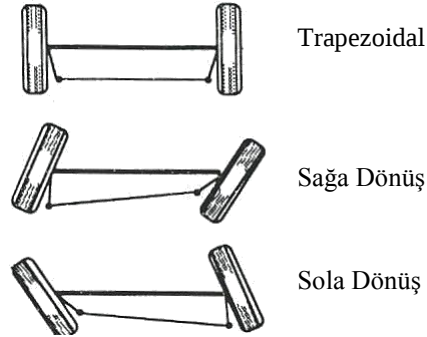
2.1.1 Taşıtlarda dönme kinematiği (kinematik geometri)

Taşıtların dönmesi sırasında ani dönme merkezinin belirlenebilmesi için tekerleklerle çizilen dikey ışınların bir noktada kesişmesi gerekmektedir. şekil 2.5 de aracın dönme merkezi görülmektedir.



Şekil 2.5 : Ackerman Dönme Geometrisi [12]

Tekerlekler düşey eksenleri etrafında ayrı ayrı ve farklı açılarla döndürülmektedir. Ackerman'a göre iç tekerlek dış tekerleğe göre daha büyük bir açı ile döner. Ackerman geometrisinin tam olarak sağlanabilmesi için karmaşık mekanizmalara gereksinim vardır. Fakat yaklaşık olarak bu geometriyi sağlayan trapezoid yapılar yönlendirme sistemlerinde kullanılmaktadır. Böylece araç dönerken iç tekerlek dış tekerleğe göre daha büyük bir açı ile dönmüş olmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Ackermann Geometrisini Sağlayan Basit Yapılar [12]

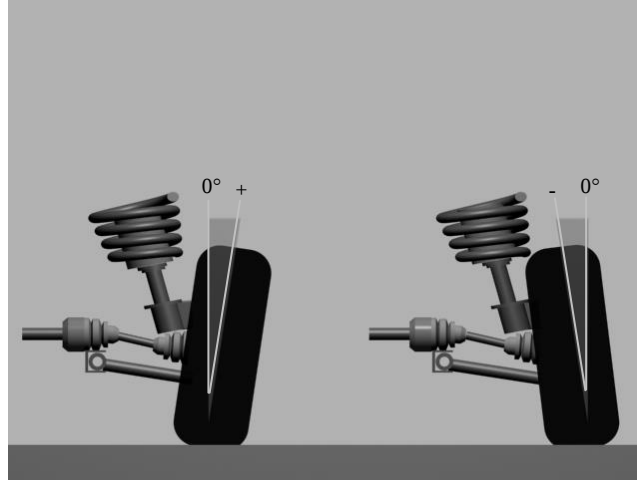
Şekil 2.5 incelendiğinde tekerlek açıları ölçüleri aşağıdaki bağıntılarla bulunabilir. Küçük açıların ters tanjantı açının kendisine yaklaşık olarak eşittir [12].

$$\delta_o = \tan^{-1} \frac{L}{(R+t/2)} \cong \frac{L}{(R+t/2)} \quad (2.1)$$

$$\delta_i = \tan^{-1} \frac{L}{(R-t/2)} \cong \frac{L}{(R-t/2)} \quad (2.2)$$

2.1.2 Kanber açısı

Tekerleklerin ekvator düzleminin düşeyle yaptığı açıya kanber açısı denir. Şekil 2.7 de kanber açısının pozitif ve negatif değerleri görülmektedir.

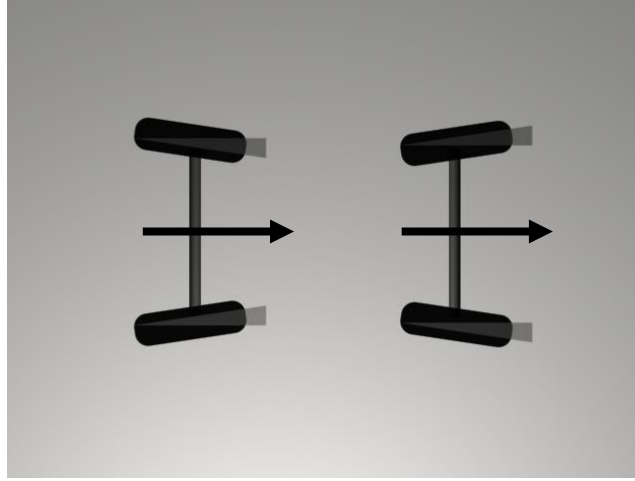


Şekil 2.7 : Pozitif Ve Negatif Kanber Açıları

Kanber açısı ön tekerleklerde genel olarak pozitifdir. Çok nadir olmakla birlikte bazı tip taşıtlarda negatif kanber açılara da rastlanabilir. Tekerleklerin pozitif bir kanber açısı ile eğik olması, taşıtın yüklü konumunda tekerleklerin yola dik olarak oturmasını sağlar. Ayrıca kanber açısı nedeni ile tekerlek aksları da eğik olurlar, bu da tekerleği göbeğe bağlayan elemanların yükünü ve yatak kuvvetlerini azaltır [12-13].

2.1.3 Toe açısı

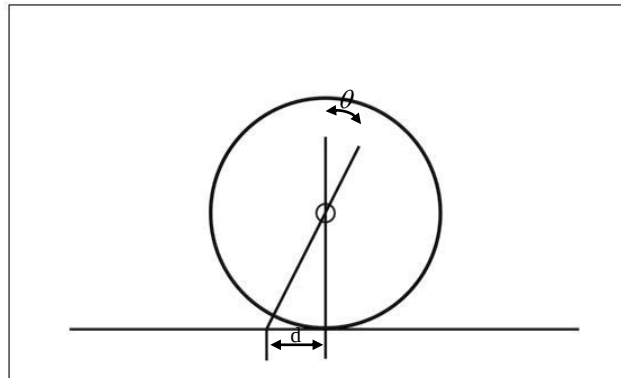
Günümüz araçlarında ön tekerlekler içe kapanık olarak imal edilirler, bu açığa toe-in açısı denir.



Şekil 2.8 : Sırası İle Toe-In ve Toe-Out Açıları

2.1.4 Kaster açısı

Kaster açısı king pin eksenini ile tekerleğin dik düzlemi arasındaki açı olarak tanımlanır. Şekil 2.9’da pozitif kaster açısı (θ) görülmektedir. Çok nadir de olsa negatif değerler aldığı örnekler de vardır.



Şekil 2.9 : Kaster Açısı

King pin eksenini uzattığımızda yolu kestiği nokta ile tekerlek merkezi arasındaki mesafe bize yapısal kaster mesafesi d 'yi verir. Bu mesafe, taşıtın dönüş hareketi sırasında pnömatik kaster mesafesi ile birlikte direksiyon simidinde hissedilen momenti etkiler [9].

2.2 Güç Takviyeli Yönlendirme Sistemleri

Otomobil teknolojisinde yaşanan gelişim ile birlikte büyük ve kuvvetli araçlar üreilmeye başlanmıştır ve otomobillerin performansları çok hızlı bir şekilde gelişim göstermiştir. Bu güçlü ve hızlı araçları kontrol etmek zorlaşmıştır. Bu duruma çözüm olarak sürücüye yardımcı güç takviyeli yönlendirme sistemleri tasarlanmıştır. İlk olarak hidrolik güç takviyeli yönlendirme sistemleri tasarlanmıştır. Bu sistemler uzun yıllar kullanılmış ve halen kullanılmaktadır. Günümüzde hidrolik sistemlerinin yanında elektrik destekli sistemler de kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerin en gelişmiş şekli elektronik direksiyon (steer by wire) denilen direksiyon ile tekerlekler arasında mekanik bir bağın olmadığı elektronik tabanlı elemanlardan oluşan sistemlerdir.



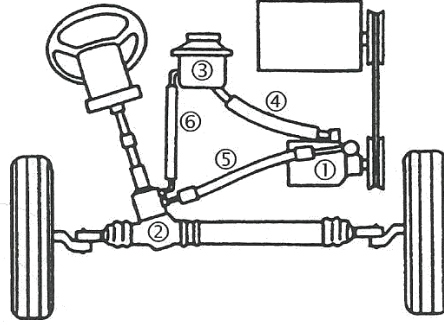
Şekil 2.10 : Hidrolik Güç Takviyeli Yönlendirme Sistemi [11]

2.2.1 Hidrolik yönlendirme sistemleri

Hidrolik güç takviyeli yönlendirme sistemleri sürücünün tekerlekleri kontrolü sırasında yardımcı olarak kullanılan hidrolik basınç uygulamasından çıkan bir terminolojidir. Hidrolik basınç tekerlekleri hareket ettirmek için gerekli gücü sağlamaya yarar. Böylece sürücünün direksiyona uyguladığı güç önemli ölçüde azalır. Hidrolik güç takviyeli olmayan büyük ve ağır araç sürücüleri düşük hızlardaki dönüşlerde ve özellikle park manevraları sırasında zorluk çekerler.

Şekil 2.11’de hidrolik güç takviyeli yönlendirme sisteminin elemanları görülebilmektedir. Hidrolik akışkan kayış kasnak bağlantısı ile motordan beslenen

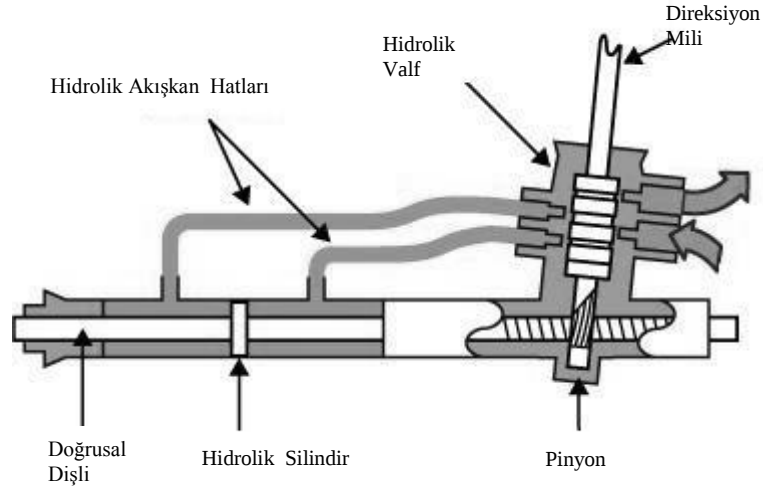
bir hidrolik pompa (1) ile tahrik edilir. Pompa, tanktan (3) emiş hattı (4) aracılığı ile aldığı akışkanı yüksek basınç hattı (5) ile pinyon ve doğrusal dişlinin (2) üzerinde bulunan hidrolik silindire ulaştırır. Basınçlı akışkan silindire kuvvet uygulayarak yönlendirme sistemi için gerekli olan kuvvetin uygulanmasına yardımcı olur.



Şekil 2.11 : Hidrolik Yönlendirme Sistem Ekipmanları [11]

Pompa, içten yanmalı motordan kayış kasnak mekanizması ile tahrik edildiği için düşük hızlarda dahi çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır, fakat bu durum yüksek hızlarda basınç artışına neden olur. Ayrıca direksiyon takviye gücü gerekli olmadığına da pompa içten yanmalı motor üzerinde bir yük olarak kalmaya devam etmektedir. Bu durum yakıt sarfiyatını olumsuz yönde etkiler.

Hidrolik sistem tarafından yönlendirme elemanlarına uygulanan güç, sürücünün uyguladığı güç ile orantılıdır. Bunun kontrolü için dişli üzerinde hidrolik silindire gönderilen basınç miktarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Direksiyon mili üzerindeki esnek bir eleman sürücünün uyguladığı momente duyarlı olduğu gibi, diğer tarafı ise pinyona bağlıdır. Böylece moment sensörü gibi hareket eder. Direksiyon iki ucunun konumları arasındaki fark valf açıklıklığına karar verir. Yükün artması sisteme uygulanan akışkan miktarının artmasına neden olur bu durum çeşitli valf tasarımları ile ayarlanabilir.



Şekil 2.12 : Pinyon, Doğrusal Dişli Ve Hidrolik Silindir Şematik Resmi [10]

Tablo 2.1 de farklı tasarımlara ait hidrolik güç takviyeli yönlendirme sistemlerine ait değerler görülmektedir.

Tablo 2.1 : Hidrolik güç takviyeli yönlendirme sistemlerine ait örnek değerler [11]

Kremayer Dişli Çapı (mm)	Piston Çapı (mm)	Kremayer Hızı (mm/rev)	Maksimum Kremayer Kuvveti (N)
23	38,1	45,2	7645
25	41,3	46,5-51,3	8995
25	41,3	46,5-51,3	8995
25	44,5	46,5	16406
31	52	47,9-52	14442

2.2.2 Elektro hidrolik yönlendirme sistemleri

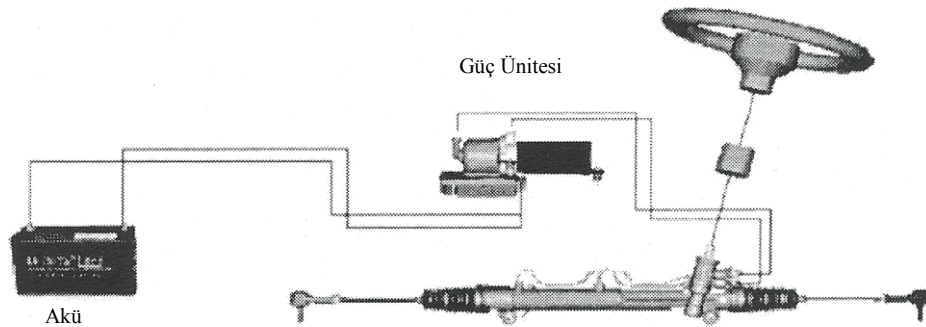
Yakıt tasarrufu günümüz araç tasarımında verilen kararlarda önemli rol oynamaktadır. Hidrolik güç takviyeli sistem, mekanik yönlendirme sistemi ile karşılaştırıldığında sürücüye sayısız avantaj sağlamaktadır. Ancak yakıt tüketimi açısından bazı dezavantajlar da getirmektedir. Çünkü hidrolik sistemde akışkanı tahrik eden pompa hareketi motordan alır, böylece motorun üzerine ikinci bir yük binmiş olur. Bu da yakıt tüketimini artırır. Bunu engellemek için elektro hidrolik

güç takviyeli yönlendirme sistemi (EHPS) diye bilinen sistem geliştirmişlerdir. Bu sistem, hidrolik güç takviyeli sistemde bulunan hidrolik sistem ekipmanları ve kremayer mekanizması ile 12 Volt doğru akım elektrik motorunu birleştirir.



şekil 2.13 : Elektro Hidrolik Yönlendirme Sistemi [14]

Elektro hidrolik güç takviyeli yönlendirme sistemi, hidrolik güç takviyeli sisteme göre pek çok avantaj sağlar. Çünkü bu sistemde hidrolik pompa kayış kasnak mekanizması ile tahrik edilmez. Hidrolik pompa için gerekli güç elektrik motorundan sağlanır. Böylece sistemin konumlandırılmasında da bir esneklik elde edilir. Hidrolik güç destekli sisteme kıyasla EHPS sistemi ile yakıt ekonomisinde %4'lük bir iyileşme sağlanabilir. Güç ünitesi düz sürüşlerde düşük hızda çalışarak akışkan enerjisini azaltır. Sürücü direksiyonu çevirmeye başladığı zaman elektrik motoru direksiyon şaftı üzerinde konumlandırılmış bulunan sensörden sinyal alır ve motor hızı artar. Böylece sisteme gönderilen hidrolik basınç miktarı artar.



şekil 2.14 : EHPS Sistem Ekipmanları [11]

şekil 2.13'de şematik olarak elektro hidrolik güç takviyeli yönlendirme sisteminin

elemanları görülmektedir. Güç ünitesi, elektrik motoru ve hidrolik pompadan oluşmaktadır. Böylece hidrolik pompa elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. Elektrik motorunun çalışması için gerekli olan enerji ise sistemde mevcut olan aküden sağlanmaktadır.

Birçok Avrupa menşeli araçta EHPS sistemi kullanılmaktadır. Tablo 2.2 de listelenen üç taşıtta birbiriyle benzer EHPS sistemi kullanmalarına rağmen aralarında birçok farklılık da mevcuttur. EHPS sistemini kullanmak bazı noktalarda çeşitliliğe izin verirken maliyeti minimize etmede benzerlik gösterir.

Tablo 2.2 : Avrupa yapımı araçlara ait EHPS örnekleri [11]

	Opel Astra/ Zafira	VW Polo	Audi A2
Elektrik Motoru	12 V dc	13,5 V dc	12 V dc
Hidrolik Pompa	Mak. 100 bar	Mak. 104 bar	Mak. 100 bar
Debi	3,5 L/dak.	2 L/dak.	2 L/dak.
	3,5 L/dak.(maks.)	5,7 L/dak.	5 L/dak.
Hidrolik Güç	500 W	500 W	500 W
Akım Değeri	6 A	2,5 A	2,5 A
	68 A (maks.)	68 A (maks.)	68 A (maks.)
Dışlı Oranı	48 mm/rev	49,8 mm/rev	49,8 mm/rev
Araç Kütlesi	1035 kg	820 kg	790 kg
Mak. Kremayer Yüğü	8200 N	6200 N	6200 N
Yönlendirme Hızı	360° /sn (8200 N'da)	360° /sn (6200 N'da)	360° /sn (6200 N'da)
	800° /sn (2800 N'da)	800° /sn (3100 N'da)	800° /sn (3100 N'da)

2.2.3 Elektrikli güç takviyeli yönlendirme sistemleri

Elektrikli güç takviyeli yönlendirme sistemleri aracılığıyla sürücüye, direksiyonu döndürme hareketi sırasında yardımcı olunmaktadır. Bir elektrik motoru yardımıyla sürücü tarafından sisteme uygulanan moment arttırılarak sürücünün daha az bir moment uygulayarak aracı kontrol etmesi sağlanmaktadır.

Elektro hidrolik güç takviyeli yönlendirme sistemi yakıt tasarrufu sağlamasına rağmen, maksimum kazanç elektrikli güç yönlendirme sistemlerindeki gibi hidrolik akışkan yerine gücün elektrik motorundan elde edilmesi ile sağlanır. Bu da sürücü tarafından çevrilen direksiyonun bir elektrik motoru aracılığıyla desteklenmesi ile gerçekleştirilir. EPS tamamen elektrik ile çalışır; motordan bağımsız bir sistem olarak tasarlanmıştır. Elektrik, akü gücünden karşılanır. Bu çalışma prensibi ile en zorlu manevralarda motor dursa bile akü gücünü kullanarak güçlü bir yönlendirme yardımı sağlamaya devam edecektir. Bu sistemde hidrolik pompanın olmaması motordaki yükü azaltarak yakıt ekonomisini arttırır. Motordaki yükün azalmasıyla, araçların hızlanma süreleri geliştirilebilir. Gelecekte sürücüler için kolay kullanım ve konfor sağlayan EPS sisteminin trafik kazalarını da azaltacağı beklenmektedir. Buna ek olarak sistemin yüksek performansı, prototip tasarımı aşamasında sistemin kolay kurulması ve sistem parametrelerinin hızlı ve basit bir şekilde ayarlanması otomobil üreticilerinin EPS'ye olan ilgisini de arttırmaktadır.

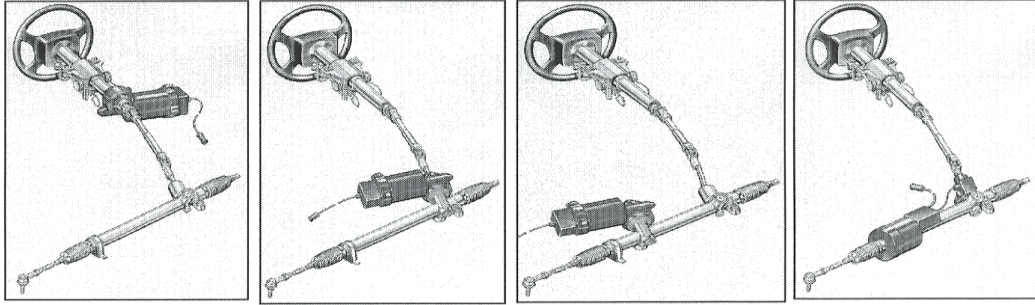
Elektronik alanında, özellikle sensör ve kontrol ekipmanlarındaki gelişmeler EPS için elverişli durumlar ortaya çıkarmıştır. Moment sensörlerindeki gelişmeler EPS sisteminin gerçekleşmesine yardımcı olmuştur. Sensörler yardımıyla sürücünün direksiyona aktardığı yön ve döndürme açısı verileri ölçülür. Bu bilgi ile elektrik motorundan gelecek takviye gücün büyüklüğüne karar verilir. EPS sistemi, mekanik pinyon dişli sistemi ile karşılaştırılınca, ağırlık tasarrufu EPS sisteminde yaklaşık 3,5 kg'dır. Bununla birlikte EPS, sonsuz vida sisteminin yerini almaya başlarsa, tasarruf daha da artar. Sonsuz vida sistemi 12,8 kg civarındadır. EPS sisteminin gelmesi ile bu ağırlığın tamamından tasarruf sağlanamaz. Sisteme EPS ekipmanları ve dişli sisteminin eklenmesi gerekecektir ama yine de kazanç 3,5 kg'den fazladır. Halen pinyon dişli sistemi ile birlikte kullanılan dört farklı tipte EPS sistemi vardır [11].

Mil Tipi: Elektrik motoru direksiyon mili üzerine monte edilmiştir.

Pinyon Tipi: Elektrik motoru pinyon dişli bağlantı noktasına monte edilmiştir.

Çiftli Pinyon Tipi: Bu modelde doğrusal dişliyi hareket ettiren iki pinyon vardır. Elektrik motoru doğrusal dişli boyunca tasarlanmış olan ikinci pinyon üzerindedir.

Doğrusal Dişli Tipi: Elektrik motoru direkt olarak doğrusal dişlinin üzerine bağlanmıştır.



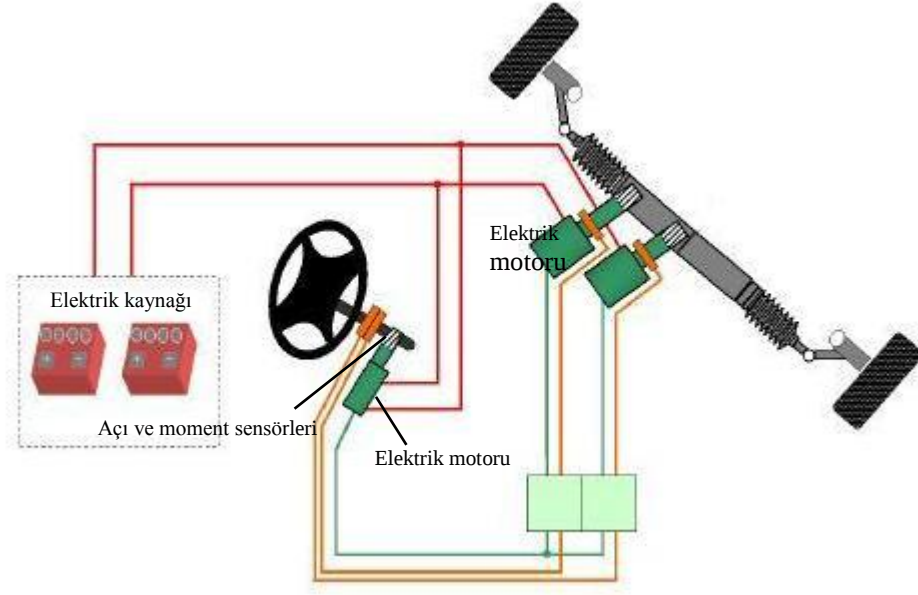
Şekil 2.15 : Çeşitli EPS Sistemleri [11]

2.3 Elektronik Direksiyon

Elektronik direksiyon kavramında, direksiyon simidi ile tekerlekler arasında mekanik bir bağ bulunmamaktadır. Mekanik sistemlerin yerini sensörlerden, aktüatörlerden ve kontrolcülerden oluşan sistemler almıştır. Bu sistemler yönlendirme performansının artmasının yanı sıra konstrüksiyon ve tasarım aşamasında mühendisler için esneklik sağlamaktadır. Direksiyon ile tekerlekler arasında mekanik bir bağ olmaması nedeni ile yoldan gelen tepkilerin sürücüye iletebilmesi için bir aktüatör kullanılmaktadır. Steer by wire sisteminde yoldan gelen tepkinin sürücüye aktüatör aracılığıyla iletilmesi bu tepkinin azaltılması ve istenmeyen tepkilerin (gürültü, titreşim gibi..) filtrelenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca bazı tehlikeli durumlarda kontrolcüler tarafından yönlendirme hakimiyeti çok kısa süreli olarak sürücüdün alınarak aracın güvenliği sağlandıktan sonra sürücüye geri verilmektedir.

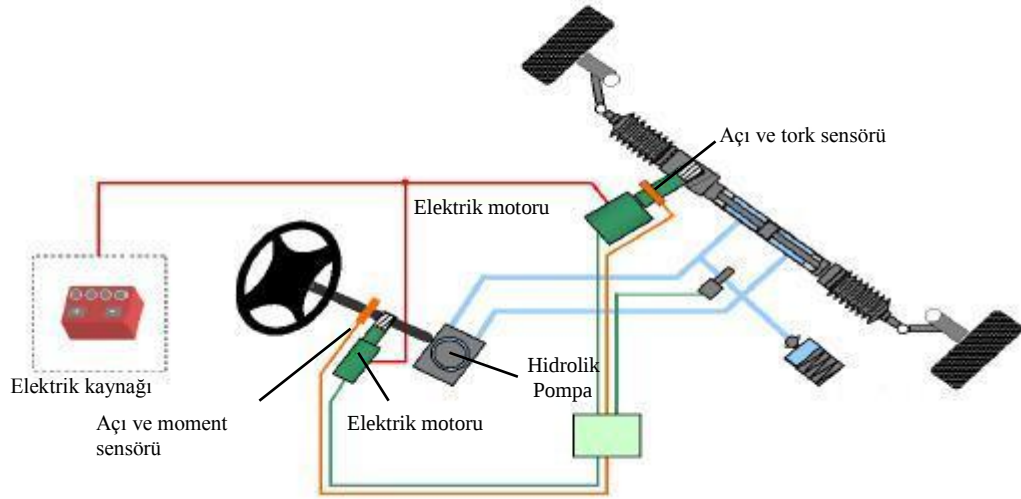
Mekanik sistemlerde dönme oranı sabit iken, elektronik direksiyon sistemi sayesinde bu oran sürücünün tercihine göre istenildiği gibi ayarlanabilir. Aynı araçta farklı direksiyon oranlarının uygulanmasına yada yönlendirme performanslarının birden fazla sürücü profiline adapte olabilecek şekilde oluşturulmasına olanak vardır. Sistemde direksiyon mili kaldırılmıştır. Direksiyona bir açışal potansiyometre

bağlanarak direksiyon açısı ölçülür. Kontrol ünitesi ayrıca açısal dönme ve araç hızı sensörlerinden de veri almaktadır. Bu veriler kontrol ünitesi tarafından işlenerek yönlendirme miline bağlı aktüatör kontrol edilir. Tekerleklerden gelecek tepki kuvveti de hesaplanarak direksiyona bağlı olan aktüatör kontrol edilmekte ve bu kuvvetin sürücü tarafından hissedilmesi sağlanmaktadır. Şekil 2.16'da elektronik direksiyon sisteminin bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2.16 : Elektronik Direksiyon [14]

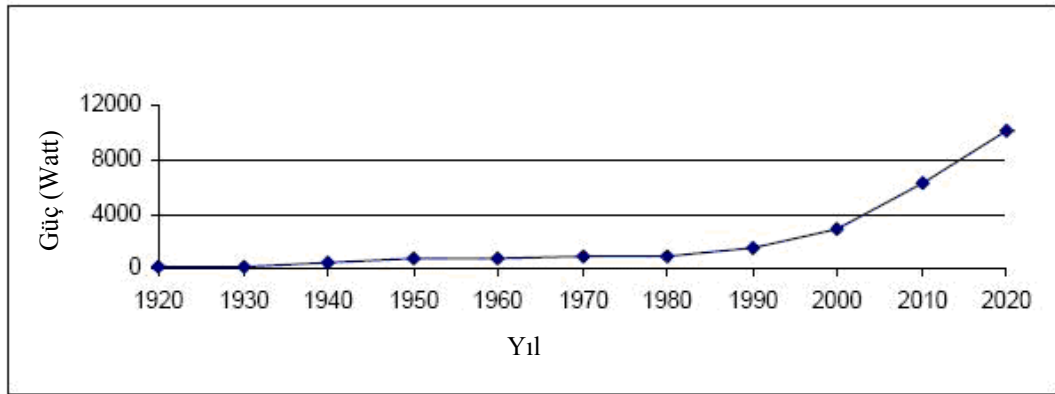
Direksiyon mili kaza anında ciddi yaralanmalara neden olmaktadır, bunu önlemek için mil kaza anında katlanacak şekilde tasarlanır. Elektronik direksiyon sisteminde milin olmaması da bu gibi yaralanmaları ortadan kaldıracaktır. Ayrıca, herhangi bir tasarım değişikliğine gerek duymadan sol veya sağdan direksiyonlu araçlarda da kullanılabilmesini sağlayacaktır. Hibrit araçlarda sistemlerin yerleştirilmesi büyük problem olduğundan elektronik direksiyonun kullanılması daha uygundur. Sistemin güvenilir olabilmesi için, zaman içinde oluşabilecek elektriksel veya donanımsal hatalarda bile sistemin görevini yerine getirmesi gerekmektedir. Bu da sisteme ek bir mekanik sistem ekleyerek ya da mevcut aktüatör ve sensörlerin yedeklerinin yerleştirilmesi ile mümkün olabilir. Şekil 2.17 de hidrolik sistemlerle yedeklenmiş bir elektronik direksiyon görülmektedir [14].



Şekil 2.17 : Hidrolik Yedekli Elektronik Direksiyon [14]

Yeni otomotiv teknolojileri pazarda yer almaya ve uygulamaya başlanırken mevcut elektrik kaynağında kullanılan 12V sistemlerin yeterli olamayacağı ortaya çıkmıştır. Mühendisler çözümün mevcut gerilim değerini 42V a çıkarmak olduğunda hem fikirler. Böylece taşıtlarda elektronik kontrollü sistemlerin kullanılmasının önü açılmış olacaktır.

Son yirmi yıl içerisinde taşıtlarda kullanılan elektrik enerjisi ihtiyacı iki katından fazla olmuştur. Şekil 2.18 de son 80 yılda ve önümüzdeki 15 yılda taşıtlarda ihtiyaç duyulan ve duyulacağı tahmin edilen elektrik enerjisi görülmektedir.



Şekil 2.18 : Yolcu Araçlarında Yıllara Göre Güç Kullanım Dağılımı [9]

Günümüzde mevcut sistemde gerekli olan akım değerlerine ulaşabilmek için sistem zorlanmakta bu da sistemin verimsiz çalışmasına neden olmaktadır. 42 V sistemlerde ise verim artmaktadır. Ama neden 42 V yerine daha yüksek değerler düşünülmemektedir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, 60V a kadar olan doğru akım sistemleri güvenlidir ve ek bir koruyucu ekipmana ihtiyaç bulunmamaktadır. Fakat 60V un üzerine çıkan anlık artışlar tehlikeli olmakta ve korunmak için özel sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da bize 42V un hem güvenli hem de gelecek otomobil teknolojilerinin ihtiyaç duyacağı elektrik gücünü sağlayacak boyutta olduğunu gösterir [14].

Çift pinyonlu EPS sisteminin denklemleri oluşturulurken Lagrange Denklemlerinden yararlanılabilir.

$$L = K - U \quad (3.1)$$

Lagrangian, sistemin kinetik enerjisi (K) ile potansiyel enerjisinin (U) farkına eşittir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

Q_i sisteme etki eden dış kuvvetleri i ise serbestlik derecesini ifade etmektedir.

Sistemdeki mekanik elemanların kinetik enerjileri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$K = K_{Mil} + K_{Motor} + K_{DireksiyonÇubuğu} \quad (3.3)$$

$$K = \frac{1}{2} J_c \dot{\theta}_c^2 + \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} M_r \dot{x}_r^2 \quad (3.4)$$

Sistemdeki mekanik elemanların potansiyel enerjileri ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$U = U_{Mil} + U_{Motor} + U_{DireksiyonÇubuğu} \quad (3.5)$$

$$U = \frac{1}{2} K_c \left(\theta_c - \frac{x_r}{r_p} \right)^2 + \frac{1}{2} K_m \left(\theta_m - \frac{x_r G}{r_p} \right)^2 + \frac{1}{2} K_t x_r^2 \quad (3.6)$$

Denklem (3.1)'den sistemin Lagrangian'ı aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$L = \frac{1}{2} J_c \dot{\theta}_c^2 + \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} M_r \dot{x}_r^2 - \frac{1}{2} K_c \left(\theta_c - \frac{x_r}{r_p} \right)^2 - \frac{1}{2} K_m \left(\theta_m - \frac{x_r G}{r_p} \right)^2 - \frac{1}{2} K_t x_r^2 \quad (3.7)$$

Denklem (3.2) için genel koordinatlar θ_c , θ_m ve x_r olarak tanımlanırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$J_c \ddot{\theta}_c + B_c \dot{\theta}_c + K_c \left(\theta_c - \frac{x_r}{r_p} \right) = T_d \quad (3.8)$$

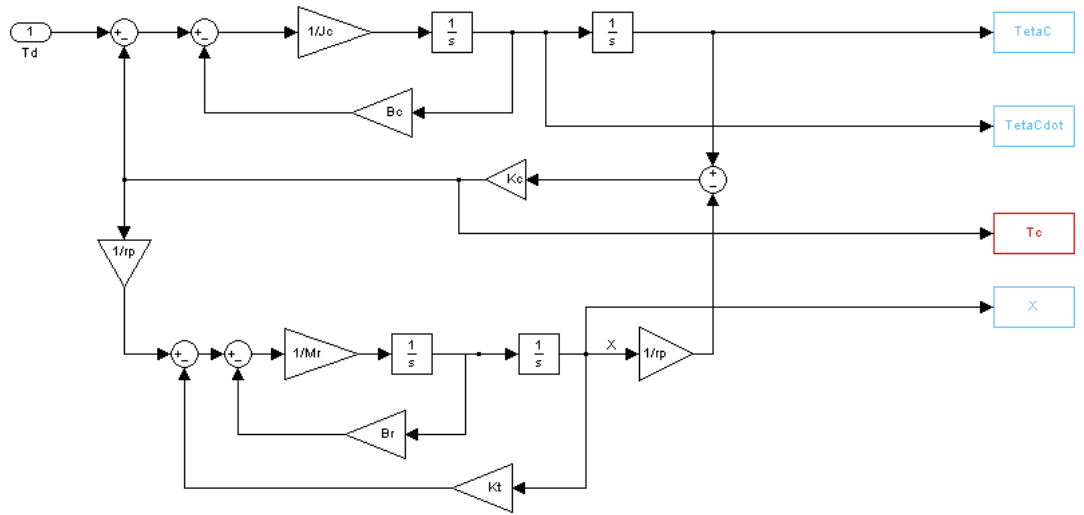
$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + K_m \left(\theta_m - \frac{x_r G}{r_p} \right) = T_m = k i \quad (3.9)$$

$$M_r \ddot{x}_r + B_r \dot{x}_r + K_t x_r = \frac{K_c}{r_p} \left(\theta_c - \frac{x_r}{r_p} \right) + \frac{K_m G}{r_p} \left(\theta_m - \frac{x_r G}{r_p} \right) + F_t \quad (3.10)$$

3.1 EPS Modelinin Alt Bölümleri

3.1.1 Direksiyon modeli

Sistemde pinyon ve kremayerden oluşan doğrusal dişli mekanizması kullanılmıştır. Bu sistemde direksiyondan gelen dönme hareketi, direksiyon mili aracılığıyla pinyon doğrusal dişli mekanizmasına aktarılır ve böylece doğrusal harekete dönüştürülür. Doğrusal dişli, bağlantı elemanı rot ile tekerlekleri döndüren yönlendirme koluna bağlıdır. Modelde sürücü tarafından girilen sürücü torkunun yanında, elektrik motorundan gelen yardımcı kuvvet girişi, tekerleklerde oluşan tekerlek kuvvetleri olmak üzere toplam üç adet girişten söz edebilir. Bu girişlere karşılık olarak üç adet çıkış elde edilir. Bunlar; direksiyon milinin konumu, direksiyon milinde oluşan tork ve direksiyon çubuğunun konumudur. Direksiyon mili döner yay kütle sönüm elemanları ile modellenmiştir. Direksiyon milinin atalet momenti J_c , sönüm katsayısı B_c ve burulma katsayısı da K_c 'dir. Direksiyon milinin matematiksel ifadesi denklem 3.8'de görülmektedir. Direksiyon çubuğunun kütlesi M_r , yay katsayısı K_t ve sönüm katsayısı da B_r 'dir. Direksiyon çubuğu dinamiği denklem 3.10'da ifade edilmiştir. Şekil 3.2'de denklem 3.8 ve 3.10'dan oluşan mekanik direksiyon modelinin Matlab Simulink Modülünde oluşturulmuş modeli görülmektedir.



Şekil 3.2 : Direksiyon Modeli

3.1.2 Elektrik motoru modeli

Elektrik motorunun matematik modeli Şekil 3.3'te görülmektedir. Görüldüğü gibi iki giriş mevcuttur, bunlardan bir tanesi E_a ile ifade edilmiş olan kontrol girişidir. Diğeri ise T_a ile ifade edilmiş olan takviye torkudur. Çıkışlar ise motor açısai konumu ve motor açısai hızıdır.

Modelde motorun mekanik bileşenleri olan J_m motor rotor ataleti ve motor ve dişli kutusu sönüm katsayısıda görülmektedir. Ayrıca mekanik yapı ile ilgili eşitlik denklem 3.9'da ifade edilmiştir. Modelin elektrik devresi denklemi

$$Li + Ri + k\phi_m = E_a \quad (3.11)$$

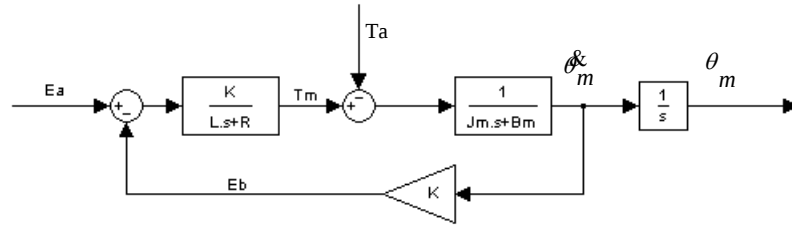
şeklindedir. Modelde doğru akım elektrik motoru kullanılmaktadır. Denklem 3.11'de bir elektrik motorunun elektriksel dinamiği ifade edilmektedir. Burada R armatür direnci, L armatür endüktansı, k zıt elektro motor kuvvet katsayısı ve i 'de akım değerini göstermek için kullanılmıştır. Birinci mertebeli bir sistemin transfer fonksiyonu ise denklem 3.12'de görüldüğü gibidir. Bu denklemde sistem cevabını belirleyen parametre τ zaman sabitidir.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.12)$$

Akış diyagramından görüldüğü üzere sistemde iki adet birinci merteye alt sistem bulunmaktadır. Bu alt sistemlerin denklemleri 3.13 ve 3.14'deki gibi ifade edilirse zaman sabitleri denklem 3.15 ve 3.16'daki gibi oluşur.

$$G_1(s) = \frac{\frac{K}{R}}{\frac{L}{R}s + 1} \quad (3.13)$$

$$G_2(s) = \frac{\frac{1}{Bm}}{\frac{J}{B}s + 1} \quad (3.14)$$



Şekil 3.3 : Elektrik Motoru Modeli

$$\tau_1 = \frac{L}{R} \quad (3.15)$$

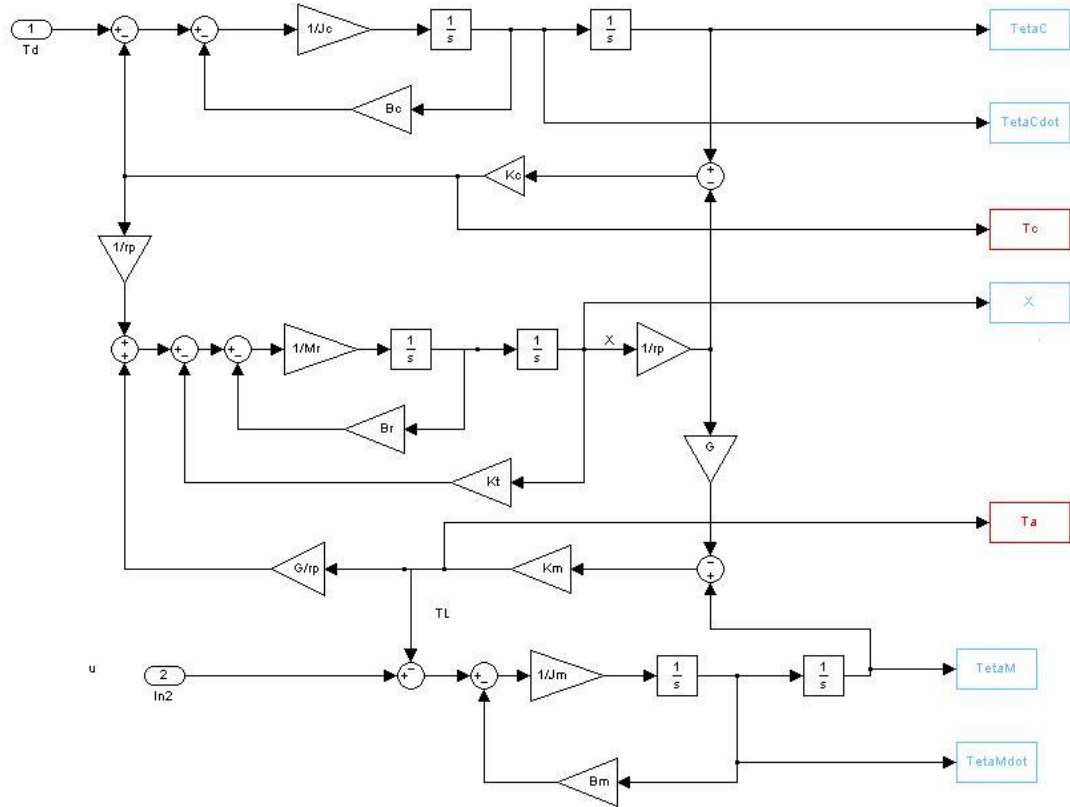
$$\tau_2 = \frac{J}{B} \quad (3.16)$$

τ_1 ve τ_2 büyüklükleri karşılaştırıldığında denklem 3.17'de verilen tasarım kriterinin sağlandığı görülür. Bu durumda küçük zaman sabitine sahip transfer fonksiyonunun sistemin dinamiğine katkısı gözardı edilebilir ve T_m doğrudan E_a ile ifade edilebilir.

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} \geq 5 \rightarrow 10 \quad (3.17)$$

Direksiyon modeli ve elektrik motoru modeli Matlab Simulink programı yardımı ile oluşturulup birbiri ile ilişkilendirildiği takdirde EPS modelinin tamamı elde edilir. Bu model kullanılarak sistemin performansı ve kontrol tasarımı için gerekli analizlerin yapımında kullanılacaktır.

Direksiyon modeli ve elektrik motoru modelinin birleştirilmesi ile Şekil 3.4'de görülen EPS Modeli elde edilmiştir.

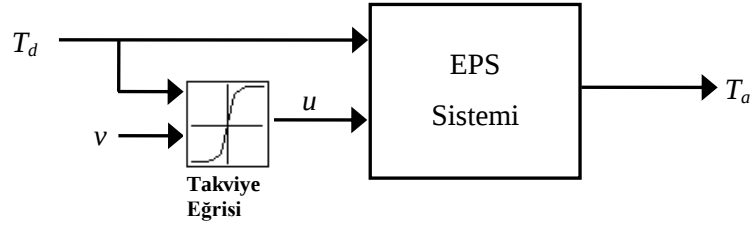


Şekil 3.4 : EPS Modeli

3.2 Takviye Eğrisi

Elektrikli güç takviye sistemlerinde elektrik motoru kontrol girişinin belirlenmesi için takviye eğrilerinden faydalanılmaktadır. Sürücü tarafından direksiyona uygulanan tork değeri moment sensörü tarafından ölçülür ve takviye eğrisinde bu

değere karşılık gelen kontrol girişi elektrik motoruna gönderilir (Şekil 3.5).

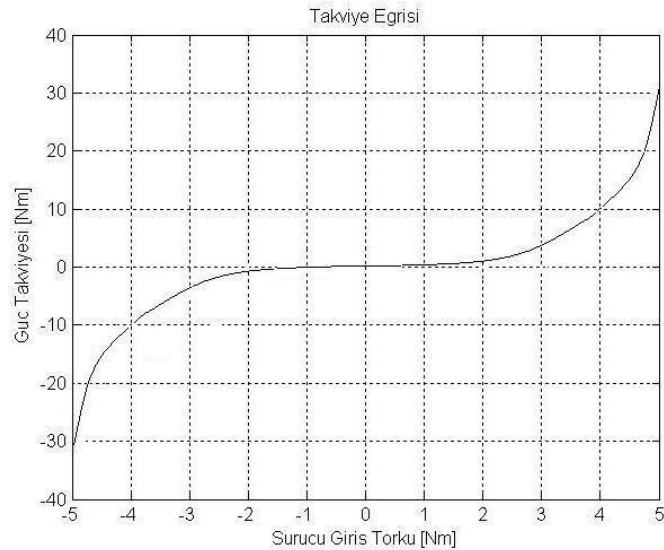


Şekil 3.5 : Takviye Eğrili EPS Sistemi

Bu eğriler doğrusal olmayıp aracın hızına göre değişim göstermektedirler. Kontrol girişi sadece direksiyon torkuna değil aynı zamanda araç hızına da bağlıdır. Farklı hız değerleri için farklı eğriler öngörülmüştür.

$$u = B(T_d, v) \quad (3.18)$$

Denklem 3.18’de ifade edildiği gibi kontrol girişi direksiyon tork’u ve araç hızının (v) bir fonksiyonudur ve bu nedenle doğrusal değildir. Düşük hızlarda yüksek güç takviyesi gerektiği için motor kontrol giriş değeri artacaktır ancak yüksek hızlarda düşük güç takviyesi gerektiği için aynı direksiyon tork değeri için motor kontrol girişi daha küçük olacaktır.

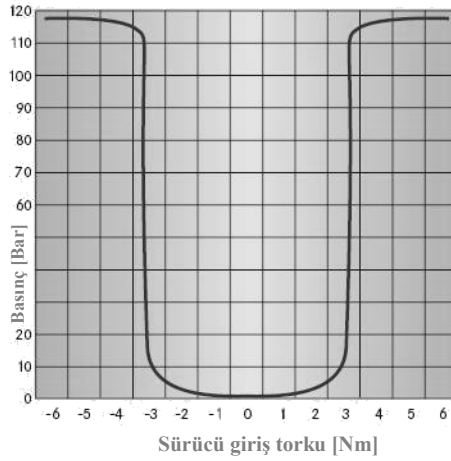


Şekil 3.6 : EPS Örnek Güç Eğrisi

Şekil 3.6’da düşük araç hızları için çizilmiş EPS güç eğrisi görülmektedir. X eksenini

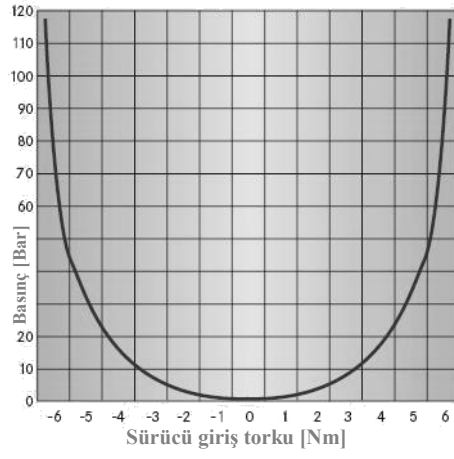
sürücü giriş torkunun, y eksenini ise bu torka karşılık gelen elektrik motoru tarafından oluşturulması gereken güç takviyesi miktarını belirler.

Takviye eğrileri hidrolik güç yönlendirme sistemleri ve elektro hidrolik güç yönlendirme sistemlerinde de kullanılmaktadır. EPS'dekine benzer bir mantık ile sürücü tarafından uygulanan tork değerine karşılık hidrolik sistemde bir basınç değerine karşılık gelirler ve araç hızına göre değişim gösterirler. Bu nedenle x eksenini EPS güç eğrilerinde olduğu gibi sürücü giriş torkunu ifade ederken buna karşılık olarak y eksenini hidrolik sistemde oluşturulacak basınç değerini ifade eder. Bu nedenle sürücü giriş torkunun yönünün değişmesi sistemde oluşacak basınç değerini değiştirmez, sadece yön valfi sayesinde hidrolik akışkanın yönü değiştirilir ve silindirin diğer yüzeyine kuvvet uygulanması sağlanır.

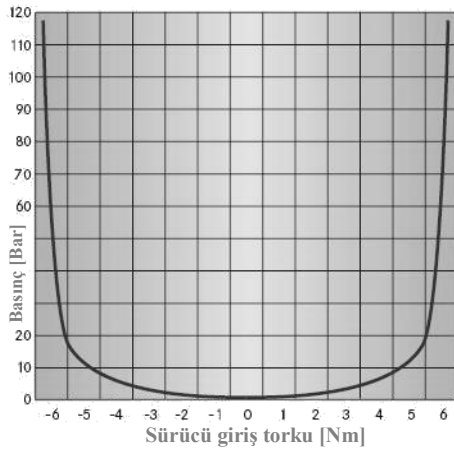


Şekil 3.7 : Park Manevraları ve Düşük Hızlarda Hidrolik Takviye Eğrisi [15]

Şekil 3.7'de park manevraları ve düşük hızlar için hidrolik takviye eğrisi görülmektedir. Aracın hızının artması ve 72 km/saat (45 mph) gibi ortalama hızlara ulaşması durumunda direksiyon sertleşecektir ve bunun için de şekil 3.8'deki takviye eğrisinin kullanılmasına ihtiyaç vardır. Araç hızının 120 km/saat (75 mph) veya daha yüksek hızlara çıkması sonucu şekil 3.9'daki takviye eğrisi devreye girer.



Şekil 3.8 : Ortalama Hızlarda Hidrolik Takviye Eğrisi [15]



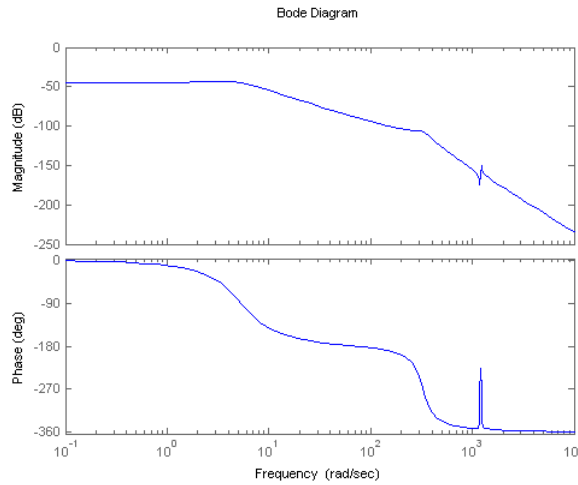
Şekil 3.9 : Yüksek Hızlarda Hidrolik Takviye Eğrisi [15]

4. KONTROL

4.1 Kontrol Tasarım Amaçları

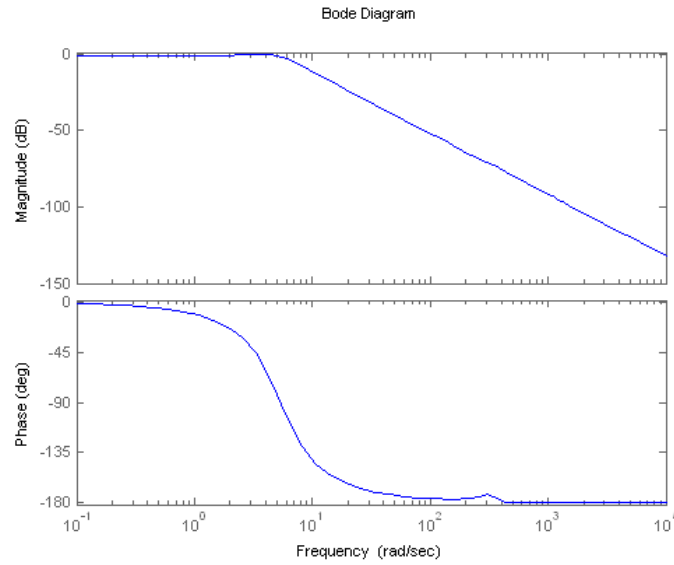
Sürücüler, sürüş güvenliği ve konforunda sürekli bir gelişim beklemektedirler. Direksiyon sistemleri aracın manevra kabiliyeti ile doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle belirli güvenlik kriterlerine uygun olmalıdır.

Elektrik güç takviyeli sistemlerde sürücüye yardımcı olarak elektrik motorundan gelen yardımcı kuvvetin miktarının analiz edilebilmesi için modelde sürücü girişini ifade eden T_d ile direksiyon çıkışının konumunu ifade eden x_r göz önüne alınmalıdır. Böylece x_r/T_d transfer fonksiyonu sisteme ne kadar güç eklendiğini göstermektedir. Yardımcı kuvvetin büyüklüğündeki değişim, hidrolik direksiyon sistemlerinde de kullanılan güç eğrilerinden faydalanılarak bulunur. Bu eğriler doğrusal olmayıp aracın hızına göre değişim göstermektedirler. Böylece farklı araç hızlarında sisteme farklı güç takviyesi uygulanabilmektedir. Şekil 4.1’de x_r/T_d transfer fonksiyonunun frekans cevabı görülmektedir. Frekans cevabın genlik değeri, farklı güç takviye değerleri için incelendiğinde değişim göstermektedir.



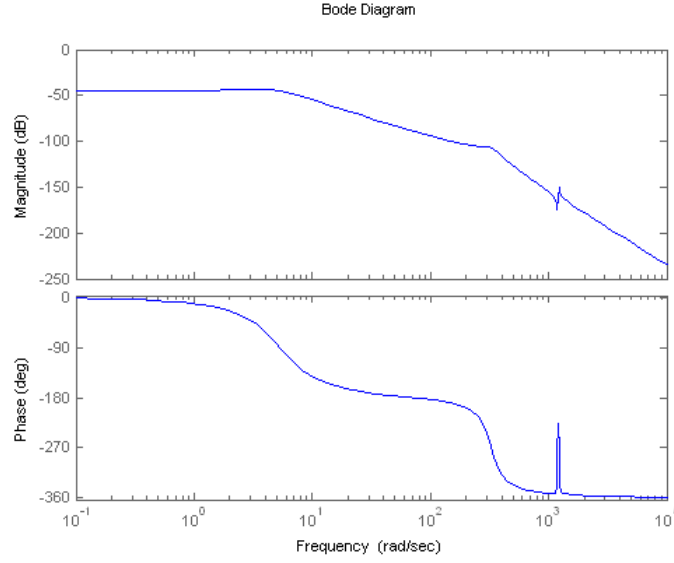
Şekil 4.1 : x_r/T_d Frekans Cevabı

Sürücünün direksiyonu yumuşak ya da sert olarak algılaması; direksiyonun, sürücünün uyguladığı tork değeri T_d 'ye karşılık olarak ne kadar açısal konum θ_c değiştirdiği ile ilgilidir. θ_c/T_d transfer fonksiyonu sürücü tarafından hissedilen direksiyon esnekliğidir. Sistemin frekans cevabı şekil 4.2'de görülmektedir. Aktif yönlendirme sistemi ile direksiyon esnekliği ayarlanabilmektedir. Araç hızına bağlı olarak ayarlanmalıdır, park manevraları gibi düşük hızlarda kolay manevra için yüksek direksiyon esnekliği gerekmektedir. Yüksek hızlarda manevra kontrolü için direksiyonun sert olması gerekir.



Şekil 4.2 : θ_c/T_d Frekans Cevabı

Sürücü için, yol ve tekerleklerden gelen kuvvetlerin toplamı olan F_t 'nin direksiyonun açısal konumu olan θ_c 'yi ne kadar etkilediği önemlidir. θ_c/F_t transfer fonksiyonu yoldan gelen kuvvetlerin ne kadarının filtre edildiğini, ne kadarının sürücüye aktarıldığını ifade eder. Yol şartlarından kaynaklanan istenmeyen kuvvetlerin sürücüye iletilmemesi gerekmektedir. Ancak sürücünün aracın kontrolünü güvenli olarak sağlayabilmesi içinde bir takım kuvvetlerin iletilmesi gerekmektedir. Şekil 4.3'de θ_c/F_t frekans cevabı görülmektedir [8].



Şekil 4.3 : θ_c/F_t Frekans Cevabı

Şekil 4.1 ve şekil 4.3 incelendiğinde Yapılan çalışmada, sürücü tarafından uygulanan tork değerine karşılık, direksiyon çubuğunun yer değişimi x_r/T_d transfer fonksiyonunun frekans cevabının, tekerlek ve yol tepki kuvvetlerinin direksiyon açısının değişimi θ_c/F_t transfer fonksiyonunun frekans cevabı ile bire bir aynı olduğu görülmektedir. Bu da yoldan gelen istenmeyen tepki kuvvetlerinin filtrelenmesi sırasında bazı kısıtlamalar getirmektedir. θ_c/F_t ve x_r/T_d 'nin birbirlerinden bağımsız olarak ayarlanamayacağını göstermektedir. Düşük frekanslarda yol ve tekerleklerden gelen tepki kuvvetlerinin filtrelenemeyeceği görülmektedir. İki transfer fonksiyonun birbirinden bağımsız yapmak için iki serbestlik dereceli kontrolcü kullanılması gerekmektedir.

4.2 Durum Uzay Modeli

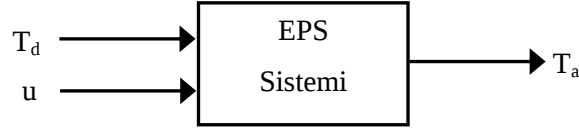
Doğrusal bir elektrikli güç yönlendirme sisteminin durum uzay modeli denklem 4.1 ve denklem 4.2'de ifade edilmektedir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{U} \quad (4.2)$$

Bu şekilde çok girişli ve tek çıkışlı bir sistem oluşturulmuştur. Sisteme, sürücü

tarafından uygulanan tork dışında ve elektrik motoru kontrol girişi olmak üzere iki giriş uygulanmaktadır. Sistem çıkışı olarak da şekil 4.4’de görüldüğü gibi direksiyon sistemine elektrik motoru aracılığıyla uygulanan sistemin güç takviyesi (T_a) alınmıştır.



Şekil 4.4 : İki Girişli, Tek Çıkışlı EPS Sistemi

Model 4.1 ve 4.2’deki matris, vektör, giriş ve çıkışlar aşağıda açıkça ifade edilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_c}{J_c} & -\frac{B_c}{J_c} & \frac{K_c}{J_c r_p} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_c}{M_r r_p} & 0 & -\left(\frac{K_c + K_m G^2}{M_r r_p^2} + \frac{K_t}{M_r}\right) & -\frac{B_r}{M_r} & \frac{K_m G}{M_r r_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{K_m G}{J_m r_p} & 0 & -\frac{K_m}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$B = [B_1 \quad B_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ \frac{1}{J_c} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_m} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_m \frac{-K_m G}{r_p} & 0 & K_m & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$D = [0 \quad 0] \quad (4.6)$$

$$x = \begin{bmatrix} \theta_c \\ \dot{\theta}_c \\ \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ x_r \\ \dot{x}_r \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$y = K_m \left(\theta_m - \frac{x_r G}{r_p} \right) = T_a \quad (4.8)$$

$$U = \begin{bmatrix} T_d \\ u \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.3 Durum Geribeslemesi ile Kutup Yerleştirme

Sistem geçici hal cevabı için davranmasını istediğimiz parametrelere bağlı olarak arzu edilen kapalı çevrim kökleri belirlenerek tüm durum geribeslemesi için uygun katsayılar belirlenerek sistemin istenilen performansta çalışması sağlanabilir.

Modelin kendisi entegratöre sahip değilse temel prensip şekil 4.5’de olduğu gibi referans giriş sinyali ile çıkış sinyali arasındaki hatayı karşılaştıran elemanla modelin arasına bir entegratör yerleştirmek olmalıdır.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (4.10)$$

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (4.11)$$

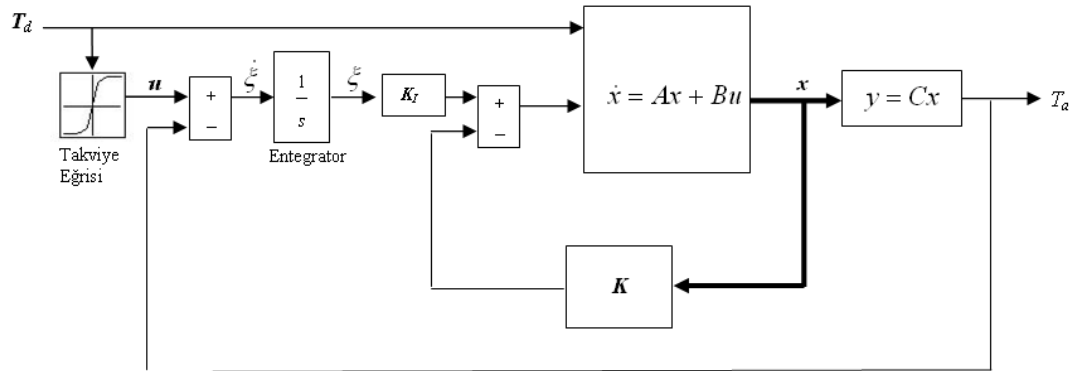
Denklem 4.10 ve 4.11’de verilen tip 0 kontrol sistemi ele alındığında, tablo 4.1’de açıklandığı gibi x durum vektörü, u kontrol sinyali ve y çıkış sinyali olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.1 : Model parametreleri

Parametreler	Semboller
Durum vektörü	x
Kontrol sinyali	u
Çıkış sinyali	y
Entegratör çıkışı	ξ
Referans giriş sinyali	r
$n \times n$ durum matrisi	A
$n \times 1$ giriş matrisi	B
$1 \times n$ çıkış matrisi	C

$$u = -Kx + k_1 \xi \quad (4.12)$$

$$\dot{\xi} = r - y = r - Cx \quad (4.13)$$

**Şekil 4.5 : Kutup Yerleştirme Tekniğine Ait Entegratörsüz Bir Model İçin Blok Diyagramı**

Referans sinyalinin $t=0$ anında uygulandığı varsayılınsın. O halde $t>0$ için sistemin dinamiğini temsil eden 4.10 – 4.13 denklemleri;

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (4.14)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\mathbf{x}(\infty)$, $\xi(\infty)$, $u(\infty)$ büyüklükleri sabit sayılara yakınsıyorsa kararlı bir sistem tasarlamak mümkün olabilir. Bu durumda kararlı rejimde $\dot{\xi}(t)=0$ ve $y(\infty)=r$ olur. Sistemin kararlı rejim halini gösteren durum-uzay modeli ise şu şekilde oluşur:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(\infty) \\ \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(\infty) \\ \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u(\infty) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty) \quad (4.15)$$

$r(t)$ sinyalinin r genliğinde basamak girişi olduğu düşünülürse $t>0$ için $r(\infty)=r(t)=r$ olur. 4.15 denkleminde 4.14 denklemi taraf tarafa çıkartılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) - \dot{\mathbf{x}}(\infty) \\ \dot{\xi}(t) - \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(\infty) \\ \xi(t) - \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} [u(t) - u(\infty)] \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_e(t) &= \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(\infty) \\ \xi_e(t) &= \xi(t) - \xi(\infty) \\ u_e(t) &= u(t) - u(\infty) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Olarak tanımlanırsa, 4.16 denklemi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_e(t) \\ \dot{u}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u_e(t) \quad (4.18)$$

Burada $u_e(t)$ ifadesi denklem 4.19 daki gibidir.

$$u_e(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}_e(t) + K_1\xi_e(t) \quad (4.19)$$

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} \text{ şeklinde } n+1 \text{ mertebesinde bir hata vektörü tanımlanırsa}$$

denklemleri şu şekilde yazılır;

$$\dot{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{e} + \hat{\mathbf{B}}u_e \quad (4.20)$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \text{ ve } \hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ olarak formülize edilirler.}$$

Bu durumda 4.19 denklemi ise şu ifadeye dönüşür;

$$u_e = -\hat{\mathbf{K}}\mathbf{e} \quad (4.21)$$

$$\hat{\mathbf{K}} = [\mathbf{K} \quad \mathbf{M} \quad K_1] \quad (4.22)$$

Tip 1 sistem tasarlamada yatan ana sebep, herhangi bir anda $\mathbf{e}(t)$ hata vektörünü herhangi bir $\mathbf{e}(0)$ başlangıç koşulu için sıfırlayabilmektir. Başka bir deyişle, sistemin başlangıç koşullarından bağımsız bir şekilde kararlı rejim hatasını sıfır kılabilme

Denklemler 4.20 ve 4.21 $n+1$ mertebesinde bir regülatör sisteminin dinamiklerini vermektedir. 4.20 denklemiyle tanımlı sistemin durum değişkenleri tamamen kontrol edilebilirse, arzu edilen karakteristik belirtilerek sistemin $\hat{\mathbf{K}}$ matrisi kutup yerleştirme metodlarıyla belirlenebilir.

Durum-uzay modelinde kararlı rejim değerleri türevsel ifadeler için 0 olacağından, (sabit değerlerin türevleri sıfıra eşittir) 4.15 denklemi şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(\infty) \\ \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ r \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}$ olarak tanımlanır ve $\text{rank}(\mathbf{P})=n+1$ olduğu gösterilirse, $\mathbf{P}$ matrisinin tersi mevcuttur. O halde kararlı rejim hatası için sistem çıkışları ve giriş büyüklüğü aşağıdaki formda yazılabilir ;

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(\infty) \\ u(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ r \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$u_e(\infty) = -\mathbf{K}\mathbf{x}_e(\infty) + K_1\xi_e(\infty) \quad (4.25)$$

4.23 ve 4.25 denklemleri aşağıdaki forma gider;

$$\xi(\infty) = \frac{1}{K_1} [u(\infty) + \mathbf{K}\mathbf{x}(\infty)] \quad (4.26)$$

Bir kez daha hatırlatılmalıdır ki, $\mathbf{P}$ matrisinin rankı $n+1$ mertebesinden olduğu için sistemin durum değişkenlerinin tamamen kontrol edilebilir olduğu varsayılmış ve ayrıca kök yerleştirme yaklaşımıyla bu problemin çözülebileceği varsayılmıştır. Durum değişkenlerinin hatası ise aşağıdaki gibi yazılabilir [16].

$$\dot{\mathbf{e}} = (\hat{\mathbf{A}} - \hat{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{K}})\mathbf{e} \quad (4.26)$$

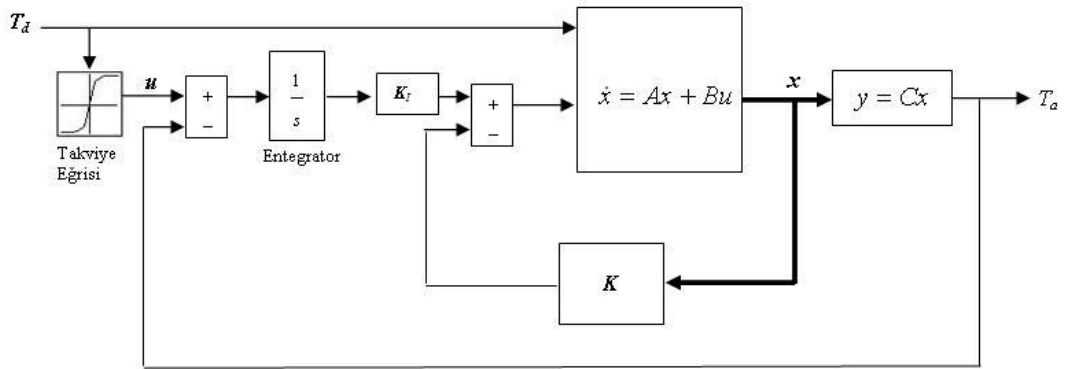
4.4 Kontrolcü Tasarımı

Sistemin durum uzay modeli açıklanırken iki girişli ve tek çıkışlı bir sistem olduğu ifade edilmişti. Birinci giriş olarak direksiyona uygulanan sürücü girişi, ikinci giriş olarak da takviye eğrisinden, sürücü girişi ve araç hızına bağlı olarak elde edilen kontrol girişi mevcuttu. Sürücü tarafından uygulanan girişin herhangi bir şekilde kontrol edilmesi mümkün değildir çünkü doğrudan mekanik sisteme uygulanan bir giriştir. Diğer giriş ise EPS’de istenen güç takviyesini elde etmek için güç eğrisi aracılığıyla üretilen elektrik motoru kontrol girişidir. Bu giriş kontrol edilerek sistem performansı istenilen seviyeye getirilebilir. Sistem çıkışı olarak da direksiyon sistemine elektrik motoru aracılığıyla uygulanan sisteme güç takviyesi (T_a)

alınmıştır. T_a çıkışı, motor kontrol girişi aracılığıyla kontrol edilerek sistemin arzu edilen performansta çalışması amaçlanmaktadır.

Sistemin kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için bölüm 4.3’de ifade edilen durum geribeslemesi ile kutup yerleştirme yöntemi kullanılacaktır. EPS sistemi tip 0 bir sistem olduğu için sürekli rejim hatasını ortadan kaldırabilmek için sisteme bir entegratör ilave etmek gerekmektedir (Şekil 4.6).

Bundan sonraki bölümde sistemin açık çevrim performansı incelenerek altıncı dereceden ifade edilen sistem ile baskın kökler yöntemi kullanılarak ikinci dereceden elde edilen sistemin geçici hal cevapları karşılaştırılacaktır.



Şekil 4.6 : Kutup Yerleştirme Tekniği ile EPS İçin Blok Diyagramı

Sistemin kökleri incelendiğinde üç adet eşlenik kökten oluştuğu görülmektedir ve köklerin hepsi sol yarı düzlemde bulunmaktadır. Bu durumda sistemin kararlı olduğu söylenebilir. Modelde kullanılan parametreler [6]’dan alınmıştır ve ekler bölümünde sunulmuştur.

$$eig(A) = \begin{bmatrix} -16.47 + 430.29i \\ -16.47 - 430.29i \\ -46.18 + 312.27i \\ -46.18 - 312.27i \\ -2.63 + 4.68i \\ -2.63 - 4.68i \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

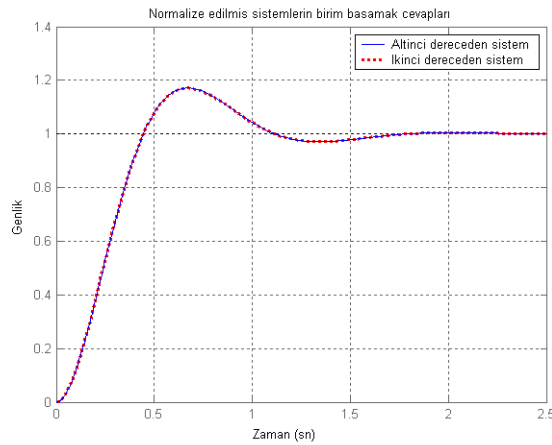
Sistemdeki kökler incelenecek olunursa $-2,63 \pm 4,68i$ ’da ki köklerinin baskın kökler oldukları görülür. Diğer kökler sanal eksene uzak olduklarından geçici yanıt

katkıları az olacaktır. Bu durumda sistemin baskın köklerinden meydana gelen ikinci dereceden bir sistem ile gerçek sistemin geçici hal cevabı yaklaşık aynı olacaktır.

Kökleri $-2,63 \pm 4,68i$ ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu oluşturulduğunda, doğal frekansı 5,37 rad/sn, sönüm oranı da 0,49 olan ikinci dereceden bir sistem elde edilmiş olunur. Elde edilen sistemin transfer fonksiyonu denklem 4.28'de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{28,84}{s^2 + 5,26s + 28,84} \quad (4.28)$$

Gerçek sistem ile ikinci derece olarak elde edilen sistemin normalize edilmiş birim basamak cevapları şekil 4.7'de görülmektedir. Grafikten de anlaşıldığı gibi elde edilen ikinci dereceden sistem ile gerçek sistemin geçici hal cevabı yaklaşık aynıdır.



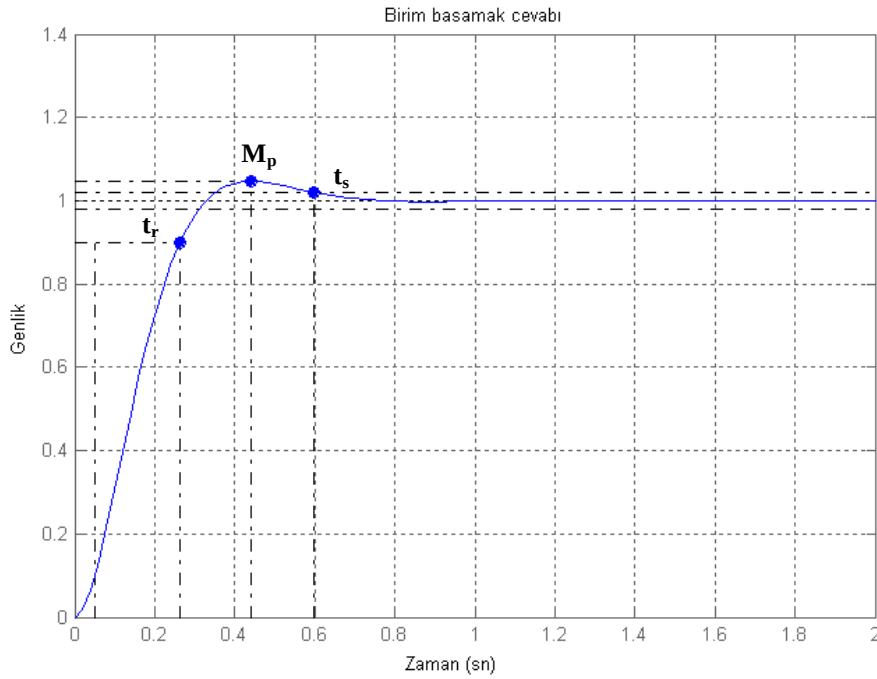
Şekil 4.7 : Gerçek Sistem İle İkinci Dereceden Sistemin Normalize Edilmiş Birim Basamak Cevabı

Gerçek sistemin birim basamak cevabı incelendiğinde yükselme zamanının $t_r = 0.30$ sn, yerleşme zamanı $t_s = 1,52$ sn ve maksimum aşım yüzdesi 0,68'inci saniyede % 17,1 olduğu görülür.

Tasarlanması düşünülen sistemin kapalı çevrim cevabının doğal frekansı 10 rad/s ve sönüm oranı 0,7 olan ikinci dereceden bir sistem gibi davranması istenmektedir. Söz konusu sistemin transfer fonksiyonu denklem 4.29'da görülmektedir.

$$H(s) = \frac{100}{s^2 + 14s + 100} \quad (4.29)$$

Bu sistemin $-7.00 \pm 7.14i$ 'de eşlenik iki kökünün bulunduğu görülmektedir. Sistemin birim basamak cevabı incelenecek olursa, yükselme zamanı $t_r = 0,21$ sn, yerleşme zamanı $t_s = 0,6$ sn ve maksimum aşım yüzdesi $0,44$ 'üncü saniyede $\% 4,62$ 'dir. Şekil 4.8'de sistemin birim basamak cevabı ve zaman tanım kriterleri görülmektedir.



Şekil 4.8 : Zaman Tanım Kriterleri

İstenilen hızda ve sönüm oranında sistemin kapalı çevrim cevabının elde edilebilmesi için sistemin istenen kapalı çevrim köklerinin tayin edilmesi gerekmektedir. İstenen kapalı çevrim cevabı ile ilgili yapılan sistem tanımlaması sonucu belirlenen ikinci derece denklemin kökleri, sistemin istenen kapalı çevrim baskın kökleri olarak tayin edildi. Diğer kökler ise aynı şekilde bırakıldı. Sistemin sürekli hal hatasını ortadan kaldırmak için integratör ilave edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle fazladan bir kök daha belirlenmesi gerekmektedir. Bu kökün baskın köklerden yeteri kadar uzakta sistemin istenen davranışını bozmayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Kapalı çevrim sistemin arzu edilen kökleri denklem 4.30'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} -16.47 + 430.29 i \\ -16.47 - 430.29 i \\ -46.18 + 312.27 i \\ -46.18 - 312.27 i \\ -7.00 + 7.14 i \\ -7.00 - 7.14 i \\ -25.00 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

EPS modeli iki giriş tek çıkış bir sistem olarak ifade edilmişti. Ancak sürücü girişi kontrol edilemeyen sürücü tarafından uygulanan bir büyüklüktür. Kontrolcü tasarımında sadece elektrik motoru girişi kontrol edilebilir. Bu durumda denklem 4.4’de verilen B matrisi yerine B_2 matrisi alınmalıdır. Böylece model tek girişli ve tek çıkışlı bir sisteme dönüşmektedir.

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$\hat{K}$ elde edilecek olursa, katsayıların sayısal ifadesi denklem 4.15 deki gibi bulunur.

$$\hat{K} = [18.42 \quad -4.53 \quad -3025.60 \quad -25.66 \quad 0.23 \quad 0.02 \quad -86.68] \quad (4.32)$$

4.5 Gözlemci Tasarımı

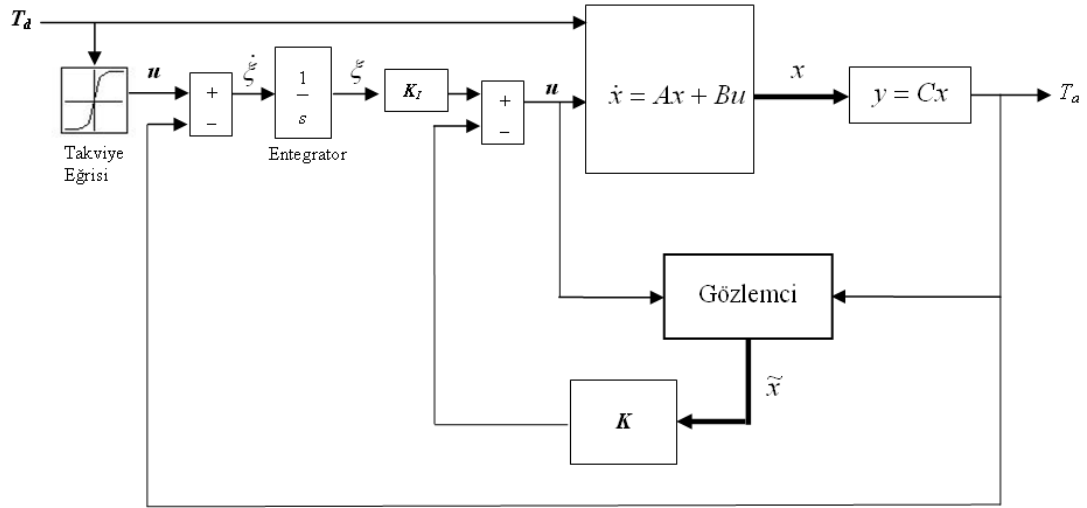
Tasarlanan kontrolcü sayesinde elektrik güç takviyeli yönlendirme sisteminin istenen değerler doğrultusunda çalıştırılması sağlanmıştır. Kontrolcü tasarımında, durum geribeslemesi ile kutup yerleştirme yöntemi kullanılmıştır bu yöntemde sistem durum değişkenleri sabit kazanç katsayıları ile geribeslenmektedir. Durum değişkenlerinin tümünü geri beslemek için çok sayıda sensöre ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle durum geribeslemesi yapının uygulanması çok masraflı ve zor olabilir. Bu nedenle gözlemci tasarlanarak sensörlerden gelebilecek gürültülerin önüne geçilmiş olmakta ve sensörlerin getirdiği maliyetlerden de kurtulmuş olunmaktadır.

Durum uzay modelinde oluşturulan bir sistemde, gözlemci tasarımı temel olarak sadece bir fark dışında sistem ile aynıdır. Bu fark başlangıç koşullarından meydana

gelebilecek durum değişkenleri ile tahmini durum değişkenleri arasındaki farktır buna başlangıç koşulu hatası denebilir.

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_e(y - C\tilde{x}) \quad (4.33)$$

Denklem 4.33’de gözlemcinin genel matematik ifadesi verilmiştir. $\tilde{x}$ gözlemci tarafından oluşturulan durum değişkenleridir. Tablo 4.1’de diğer parametreler ifade edilmiştir. K_e Matrisi, gözlemci kazanç matrisi olarak tanımlanır. Sistemin gerçek cevabı ile gözlemci tarafından oluşturulan cevabın farkının ortadan kaldırmaya yönelik kullanılmaktadır. Şekil 4.9’da Eps modeli için gözlemci tasarımı görülmektedir.



Şekil 4.9 : EPS Modeli İçin Gözlemci Tasarımı

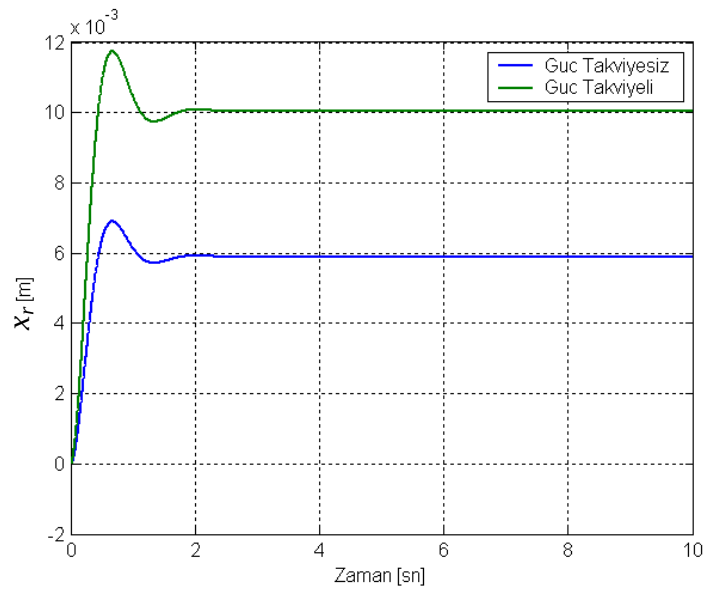
Gözlemci tasarımı sırasında K_e katsayılarının belirlenmesi ve gözlemcinin istenilen performansta çalışabilmesi için gözlemci köklerinin kontrolcü köklerinden 2 ila 5 kat kadar hızlı olması gerekmektedir. Tasarlanması düşünülen sistemin kapalı çevrim cevabının doğal frekansı 10 rad/s ve sönüm oranı 0,7 olan ikinci dereceden bir sistem gibi davranması istenmektedir. Bu durumda gözlemci için baskın kökler $-14 \pm 14.28i$ olarak hesaplanırsa denklem 4.34’te gözlemci kazanç değerleri görülmektedir.

$$K_e = [5392.3 \quad 20595 \quad 37.87 \quad 147.29 \quad 2499.7 \quad 9724.4] \quad (4.34)$$

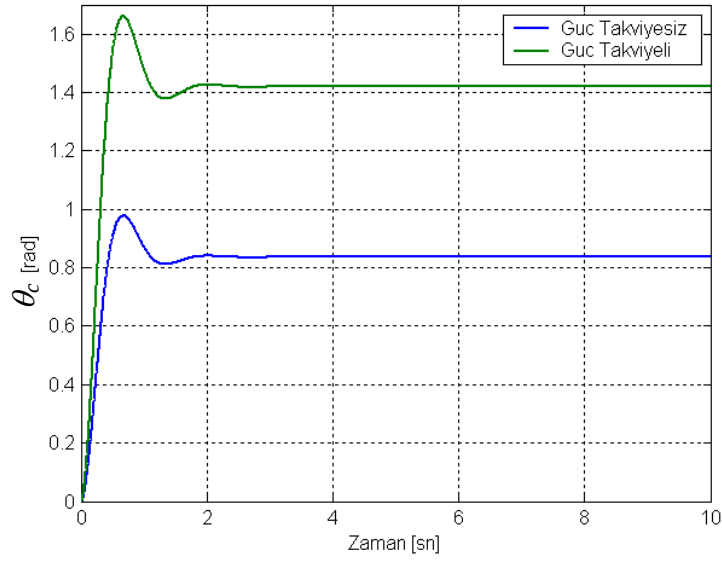
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

5.1 Güç Takviyesiz Sistem Cevapları

Sisteme birim basamak değerinde sürücü tarafından bir giriş verildiğinde, açık çevrimli modellerin ilki güç takviyesiz, ikincisi ise güç takviyeli olacak şekilde çalıştırıldığında iki sistemin cevap farklarını incelemek amaçlanmaktadır.



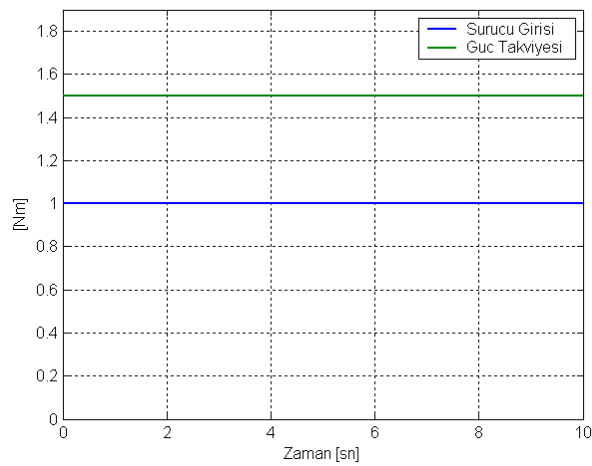
Şekil 5.1 : Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi



Şekil 5.2 : Direksiyon Mili Açısal Konumu

Güç takviyeli ve sadece mekanik sistemden oluşan direksiyon sistemlerinin birim basamak cevapları incelendiği zaman, sürücü tarafından aynı direksiyon girişine karşılık elektrik güç takviyeli sistemde direksiyon çubuğu yer değişimi (Şekil 5.1) ve direksiyon mili açısal konumu değişimi (Şekil 5.2) daha fazla olmuştur. Ancak maksimum aşma oranında da bir artış meydana gelmiştir

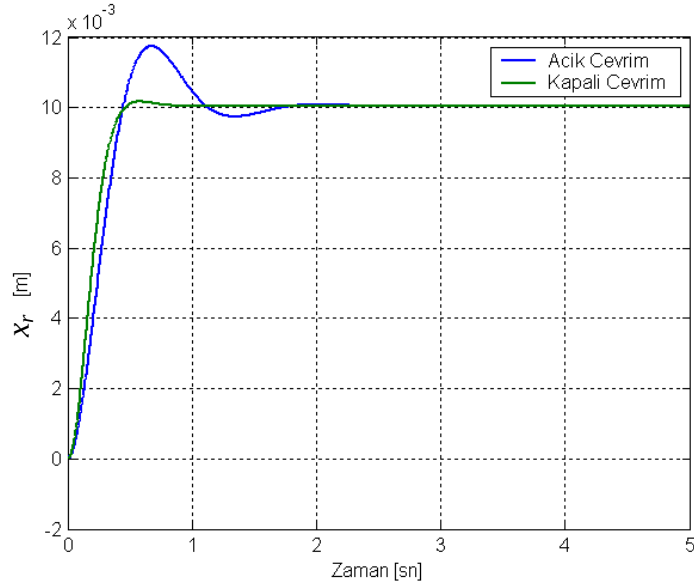
5.2 Güç Takviyeli Sistem Cevapları



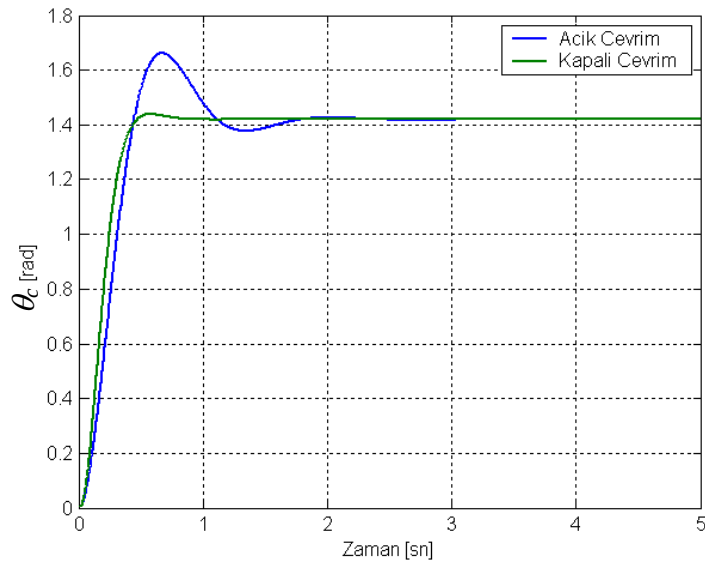
Şekil 5.3 : Sisteme Uygulanan Giriş Değerleri

Açık çevrimli güç takviyeli yönlendirme sistemi ile tasarlanan kontrolcünün

uygulandığı kapalı çevrimli güç takviyeli yönlendirme sisteminin simülasyonu gerçekleştirilerek iki sistemin cevapları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.3’de yönlendirme sistemlerine uygulanan sürücü girişi ve EPS sisteminde elektrik motoru tarafından uygulanan güç takviyesi görülmektedir.



Şekil 5.4 : Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi

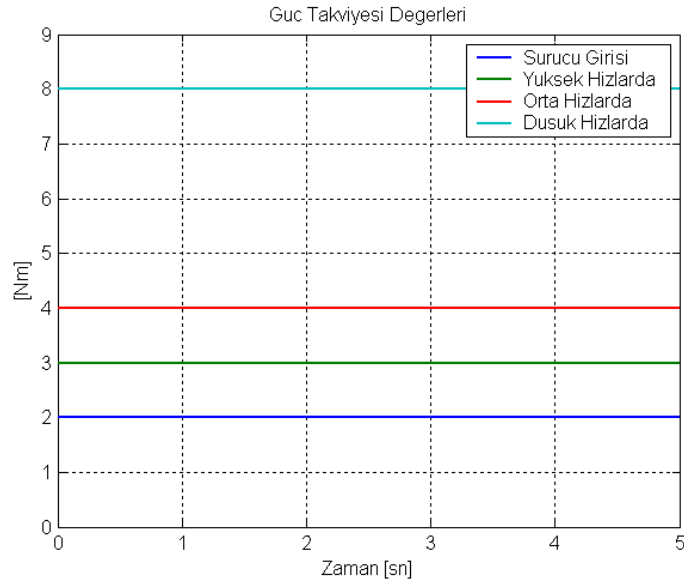


Şekil 5.5 : Direksiyon Mili Açısal Konumu

Şekil 5.4’de direksiyon çubuğu yer değişiminin kapalı ve açık çevrim cevaplarının sürekli hal değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 5.5’de direksiyon mili açısal konumunun sürekli hal değerlerinin aynı olduğu

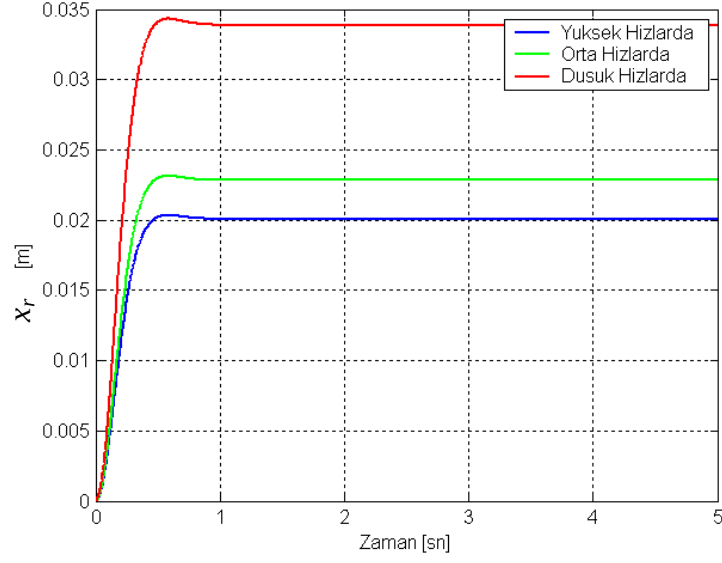
görülmektedir. Yani her iki sistemde arzu edilen değerlere ulaşmıştır. Ancak kontrolcü tasarım aşamasında da söz edildiği gibi yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve maksimum aşım yüzdesi gibi değerler incelendiğinde de açık çevrimli sistemin beklenen performansta cevap veremediği görülmektedir.

5.3 Farklı Hızlarda Güç Takviyesi

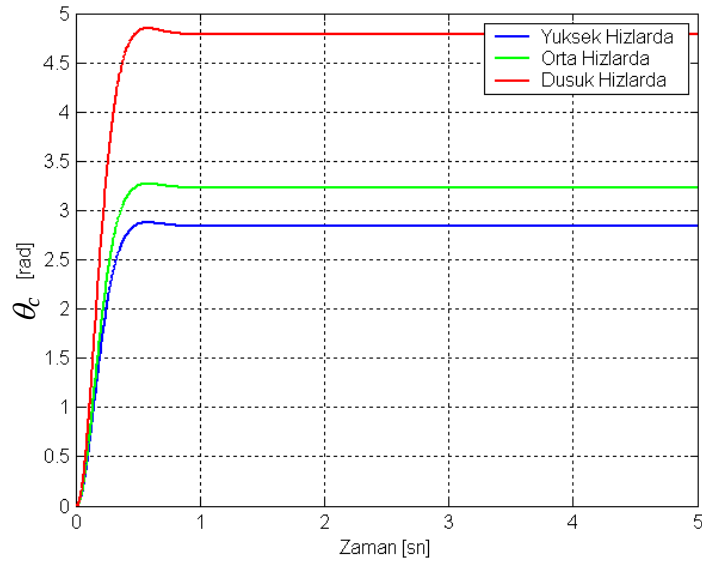


Şekil 5.6 : Farklı Hızlar İçin Sisteme Uygulanan Güç Takviyesi Değerleri

Bir EPS sisteminde araç hızına göre farklı takviye eğrileri kullanılmaktadır. Bu eğrilerin sistem cevabını nasıl etkilediğinin incelenmesi için oluşturulan modelin aynı sürücü girişine karşılık üç farklı hız seviyesi için cevabının farklılıklarının gözlenmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.6’da 2 Nm’lik sürücü girişine karşılık düşük, orta ve yüksek hızlar için sisteme uygulanan güç takviyesi değerleri görülmektedir.



Şekil 5.7 : Aynı Direksiyon Giriş Değeri İçin Farklı Hızlarda Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi Değerleri



Şekil 5.8 : Aynı Direksiyon Giriş Değeri İçin Farklı Hızlarda Direksiyon Mili Açısal Konumu

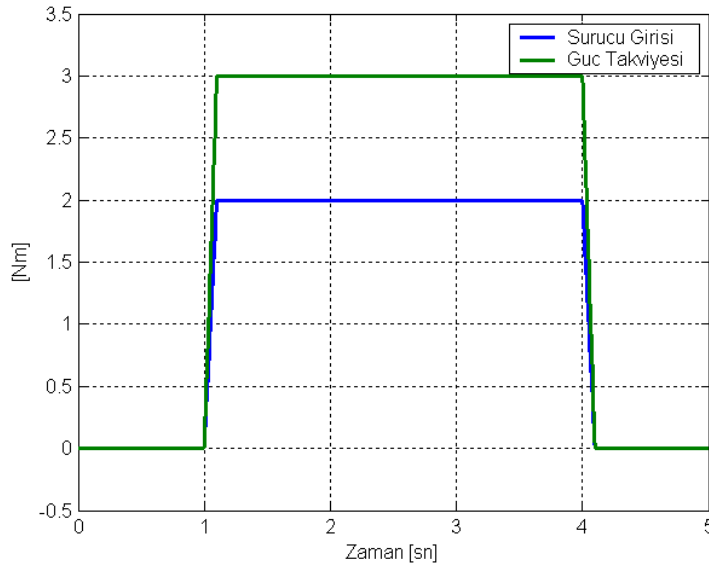
Şekil 5.7’de direksiyon çubuğu yer değişimindeki farklı değerler elektrik motorundan elde edilen takviye kuvvetlerin farklılığını ortaya koymaktadır. Bölüm 4.1’de ifade edildiği gibi x_r/T_d transfer fonksiyonu sisteme ne kadar güç eklendiğini göstermektedir.

Şekil 5.8’de ise farklı direksiyon mili açısal konum değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu da sürücünün direksiyonu yumuşak ya da sert olarak algılamasını

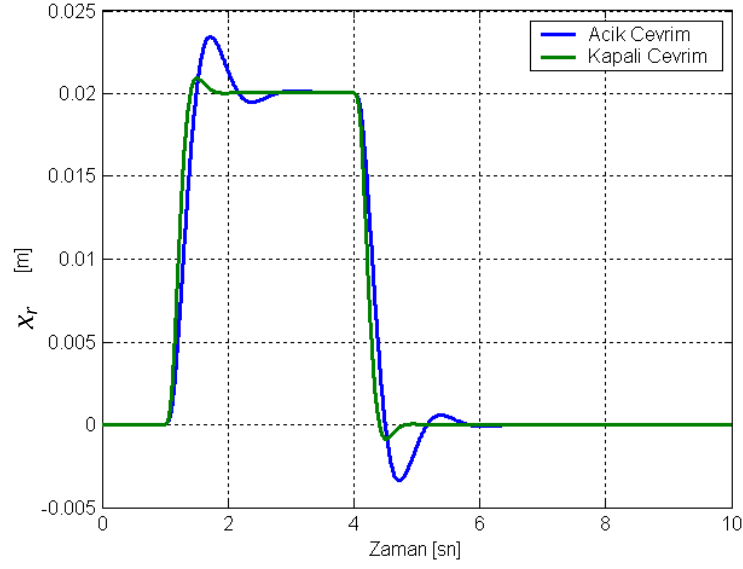
sağlayacaktır. Düşük hızlarda daha yüksek güç takviyesi böylece yumuşak direksiyon, yüksek hızlarda düşük güç takviyesi böylece ani hareketlerden doğabilecek kazaların önlenmesi amaçlanmaktadır.

5.4 Şerit Değiştirme Manevrası

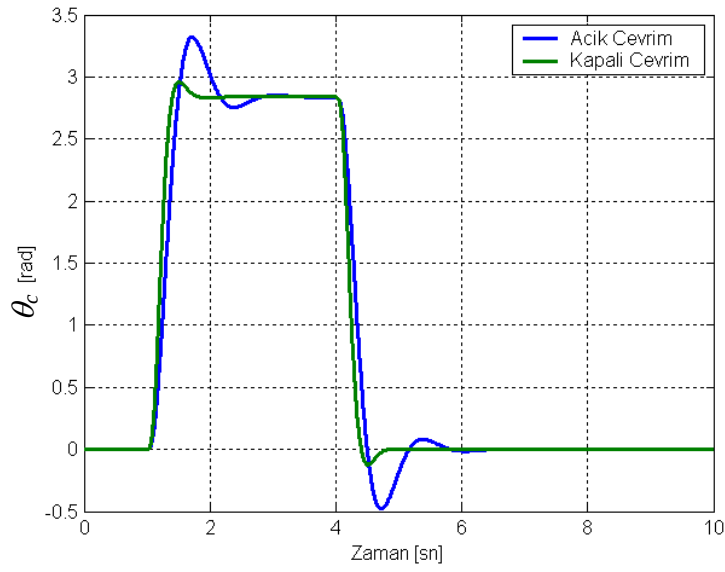
Sürücünün arka arkaya aynı tork değerini farklı yönlerde uygulaması sonucu oluşturulan bir manevra ele alınarak sistemin performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Böylece tasarlanan kontrolcünün uygulandığı kapalı çevrimli güç takviyeli yönlendirme sistemi ile açık çevrimli güç takviyeli yönlendirme sisteminin performansının karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 5.9’da sisteme uygulanan sürücü ve güç takviyesi değerleri görülmektedir.



Şekil 5.9 : Sisteme Uygulanan Güç Takviyesi Değerleri



Şekil 5.10 : İçin Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi



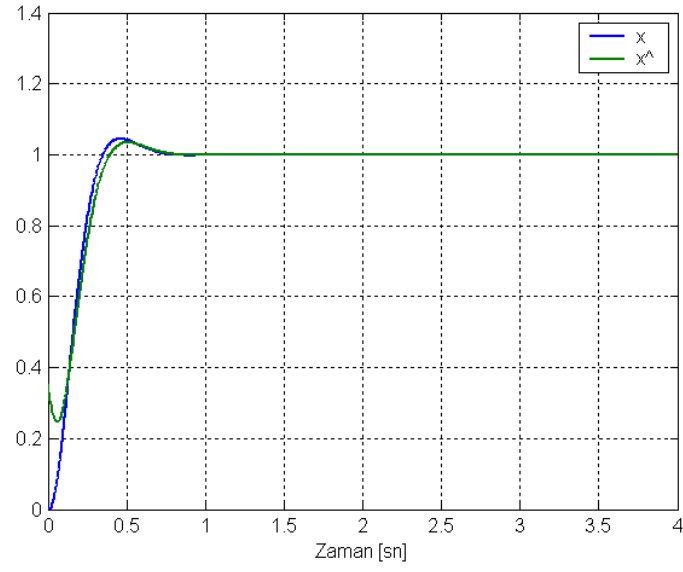
Şekil 5.11 : Direksiyon Mili Açısal Konumu

Şekil 5.10 ve 5.11 incelendiğinde tasarlanan kontrolcünün uygulandığı kapalı çevrim sisteminin sönüm oranının arttığı ve sistem cevabının hızlandığı görülmektedir.

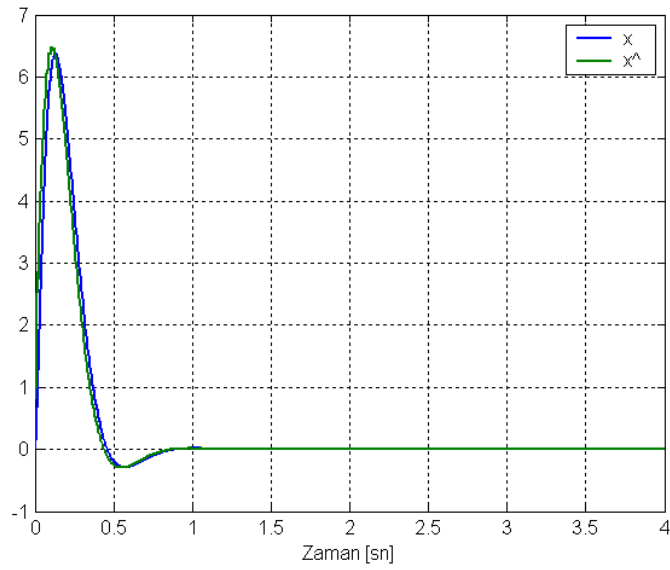
5.5 Gözlemci Performansının İncelenmesi

Bölüm 4.5'te tasarlanan gözlemcinin performansının incelenmesi için durum değişkenleri ile gözlemci tarafından oluşturulan durum değişkenleri arasında

başlangıç değeri farkı yaratılarak gözlemcinin performansı incelenmiştir.



Şekil 5.12 : Normalize Edilmiş Direksiyon Çubuğu Yer Değişimi



Şekil 5.13 : Normalize Edilmiş Direksiyon Çubuğu Hızı

Gözlemci performansının incelenebilmesi için Şekil 5.12’de başlangıç değeri farkı yaratılarak gerçek ve gözlemci tarafından oluşturulmuş direksiyon çubuğu yer değişiminin normalize edilmiş hali, Şekil 5.13’de ise direksiyon çubuğu hızının normalize edilmiş hali görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada güç takviyeli yönlendirme sistemleri incelenerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu sistemler arasında elektrik güç takviyeli yönlendirme sistemlerinin farklılığı vurgulanarak, diğer sistemlere göre avantajları açıklanmıştır.

Elektrik güç takviyeli yönlendirme sisteminin Matlab Simulink programında modeli oluşturularak, sistemin performansı incelenmiştir. Sisteme etki eden yardımcı kuvvet miktarı, direksiyon esnekliği, tekerlekler ve yoldan gelen kuvvetlerin sürücüye iletilmesi incelenmiş ve kontrolcü tasarlanırken bu tasarım kriterleri üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmada, sürücü tarafından uygulanan tork değerine karşılık, direksiyon çubuğunun yer değişimi x_r/T_d transfer fonksiyonunun, tekerlek ve yol tepki kuvvetlerinin direksiyon açısının değişimi θ_c/F_t transfer fonksiyonunun bire bir aynı olduğu görülmüştür. Bu da yoldan gelen istenmeyen tepki kuvvetlerinin filtrelenmesi sırasında bazı kısıtlamalar getirmektedir.

EPS sisteminin modelinde, durum geri beslemeli kutup yerleştirme yöntemi ile kontrolcü tasarlanmış ve sistemin kontrolü sağlanmıştır. Bu yöntemde sistem durum değişkenleri sabit kazanç katsayıları ile geribeslenmektedir. Durum değişkenlerinin tümünü geri beslemek için çok sayıda sensöre ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle gözlemci tasarlanarak sensörlerden gelebilecek gürültülerin önüne geçilmiş olmakta ve sensörlerin getirdiği maliyetlerden de tasarruf edilmiştir.

Oluşturulan model üzerine, tasarlanan kontrolcü ve gözlemci ilave edilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiş sistemin farklı koşullar için verdiği tepkiler incelenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Zaremba A.T., and Davis R.I.**, 1995. Dynamic Analysis and Stability of a Power Assist Steering System, *Proceedings of the American Control Conference*, Washington, 4253-4257.
- [2] **Zaremba A.T., Liubakka M.K., and Stuntz R.M.**, 1998. Control and steering feel issues in the design of an electric power steering system, *Proceedings of the American Control Conference* , **1**, 36-40.
- [3] **Zaremba A.T., Liubakka M.K., and Stuntz R.M.**, 1997. Vibration Control based on Dynamic Compensation in an Electric Power Steering System, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 453-456
- [4] **Badawy A., Zuraski J., Bolourchi F., and Chandy A.**, 1999. Modeling and Analysis of an Electric Power Steering System, *Society of Automotive Engineers, Inc.*,
- [5] **Chabaan R.C, Wang L.Y.**, 2001. Control of Electric Power Assist Systems: H_{∞} Design, Torque Estimation and Structural Stability, *Society of Automotive Engineers of Japan*.
- [6] **Parmar M., and Hung J.Y.**, 2004. A Sensorless Optimal Control System for an Automotive Electric Power Assist Steering System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **51**.
- [7] **Parmar M., and Hung J.Y.**, 2002. Modeling and Sensorless Optimal Controller Design for an Electric Power Assist Steering System, *IECON, 28TH IEEE Annual Conference of Industrial Electronics*.
- [8] **Güvenç L., Ersolmaz Ş.S., Öncü S., Öztürk E.S., Çetin E., Kılıç N., Güngör S., and Kanbolat A.**, 2006. Stability Enhancement of a Light Commercial Vehicle Using Active Steering, *SAE Technical Paper*.
- [9] **Judge A. W.**, 1966. The mechanism of the car: its principles, design, construction and operation, Chapman and Hall, London.
- [10] <http://auto.howstuffworks.com/steering.htm> 2005
- [11] **Holt D. J.**, 2002. Electric steering: A revolution in steering technology, *Society of Automotive Engineers, Inc., USA*
- [12] **Gillespie T.D.**, 1992. Fundamentals of vehicle dynamics, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, USA

- [13] **Erzi A. I.**, 2001. Cadde ve Ray Taşıtlarının Dinamiği, Ders notları, İTÜ, İstanbul.
- [14] **Harter W., Pfeiffer W., Dominke P., Ruck G., Blessing P.**, 2000. Future Electrical Steering Systems: Realizations with Safety Requirements, Society of Automotive Engineers, Inc., USA
- [15] <http://www.mercedes-benz.com> 2005
- [16] **Ogata, K.**, 1994. Designing Linear Control Systems with MATLAB, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- [17] **Erzi A. I.**, 1975. Motorlu Taşıtlar, Ders notları, İTÜ, İstanbul.
- [18] **Bauer H.**, 2000. Automotive handbook, Robert Bosch GmbH, Stuttgart.
- [19] **Kuo, B.C.**, 2002. Otomatik Kontrol Sistemleri, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [20] **Ogata, K.**, 2002. Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
- [21] <http://autoelectronics.com> 2006
- [22] **Gusev S.V. and Zaremba A.T.**, 1999. LMI Based Minimax Control Under Component-wise Constraints on the Inputs with Application to an Electric Power Steering System, *Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control*, Phoenix, Arizona USA, 2353-2358.
- [23] **Cetin A.E., Sinanoğlu B., Güngör S., Kanbolat A., and Adlı M.A.**, 2005. Compliant Control of Electric Power Assisted Steering Systems, *Society of Automotive Engineers*.

EKLER

Tablo A.1 : Modelde kullanılan katsayılar ve semboller

Parametreler	Semboller	Değerler	Birim
Sürücü tarafından uygulanan	T_d		Nm
Elektrik motorunun	T_m		Nm
Direksiyon mili açısal konumu	θ_c		rad
Direksiyon çubuğu yer	x_r		m
Motor mili açısal konumu	θ_m		rad
Motor akımı	i		A
Motor kontrol gerilimi	v		V
Direksiyon mili atalet	J_c	0,04	kg m ²
Direksiyon mili burulma	K_c	172	Nm/rad
Direksiyon mili sönüm	B_c	0,0225	Nm/(rad/s)
Direksiyon çubuğu kütlesi	M_r	32	kg
Direksiyon çubuğu sönüm	B_r	3920	N/(m/s)
Direksiyon çubuğu yay	K_t	23900	N/m
Pinyon yarıçapı	r_p	0,0071	m
Motor dişli oranı	G	0,4686	
Motor atalet momenti	J_m	4,52x10 ⁻⁴	kg m ²
Motor ve dişli kutusu burulma	K_m	125	Nm/(rad/s)
Motor ve dişli kutusu sönüm	B_m	3,339x10	N/(m/s)

ÖZGEÇMİŞ

Alper Sarıkaya 1979 yılında İstanbul'da doğdu. Lise eğitimini Üsküdar Fen Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1997 yılında girdiği, İTÜ Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği bölümünü 2002 yılında tamamladı. Aynı sene İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2004-2005 yılları arasında Malatya'da askerlik hizmetini tamamladı. Halen Bosch Rexroth A.Ş.'de proje ve satış mühendisi olarak görev yapmaktadır. Alper SARIKAYA İngilizce bilmektedir.