Sürücü Koltuğu Simülatörü Tasarımı ve Sistem Bileşenlerinin Ekonomik Karşılaştırılması

[1*]Murat Cihan Çalışkan ve [1]Ünal Uysal
[1] Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Özet

Simülatörler özellikle gerçek sistem üzerinde denenmesi tehlikeli veya imkansız olan eğitim konuları için ya da halihazırda olmayan sistemlerin davranışlarının gözlenmesi ve incelenmesi için kullanılır. Bu yöntem ile Araç sürücü Koltuğu simülatörü yapmak, başta sürücü kurslarında verilen pratik eğitimin daha ekonomik, daha verimli ve daha güvenli bir şekilde yapılmasını sağlamakla birlikte; böyle bir simülatör eğlence amaçlı da kullanılabilir. Bu doğrultuda düşünülen sistem, sanal ortamda bir güzergah hazırlanması simülatörün temel hedefidir. Sonrasında özel bir zemine yerleştirilen sürücü koltuğunun Bu sistem hidrolik güç üniteli silindirler ile hareketlendirilecektir. Bu hareket elektronik olarak daha önce kaydedilmiş bir yolda yapılan sürüş çalışmasının mekanik sisteme hidrolik silindirler yardımıyla aktarılması düşünülmektedir. Tüm bunlar ve sanal güzergah bir ekranda gösterilmekte ve her bir sistem parçası birbiriyle uyumlu çalışmaktadır. Ayrıca sistemin çalışması için gereken enerjiyi alternatif olarak değerlendirmekte ve ekonomik olarak karşılaştırılması yapılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Sürücü koltuğu, sürücü simülatörü, hidrolik sistem tasarımı

1. Giriş

Simülasyon yöntemi gerçekte denenmesi tehlikeli veya imkansız olan ve özellikle eğitim amaçlı kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde ya halihazırda olmayan sistemler ya da gerçek sistemin bir modeli üzerinde, o sistem ile alakalı kısmen veya tüm özelliklerini simülatörü kullanan kişinin tecrübe etmesi, sistem davranışlarını incelemesi sağlanır. Bu sayede simülatörü kullanan kişinin gerçek sistem üzerinde yaşayabileceği olumlu/olumsuz tüm olaylar daha güvenli bir şekilde yansıtılmış olur.

Simülatörlerin mazisi çok eski olmamakla birlikte birçok alanda simülatörler mevcuttur. Bunların birkaç tanesi; eğlence simülatörleri, sağlık simülatörleri, iş makinesi simülatörleri, uçak simülatörleri, afet simülatörleri, gemi simülatörleri, sürücü simülatörleridir. Aynı zamanda daha farklı alanlarda da birçok simülatörler mevcuttur.

Avrupa'da meydana gelen kazaların %80'i dört kategoridedir: Tek araçlı kazalar (yoldaki yürüyenlere çarpma, refüj, duvar gibi engellere çarpma vb.), İki araçlı kazalar, kavşaklarda oluşan kazalar ve yayaların sebep olduğu kazalar. Tek araçlı kazalar ve iki aracın kafa kafaya çarpışması OECD'nin 1999 verilerine göre tüm kazaların %48'ini oluşturmaktadır. [1]

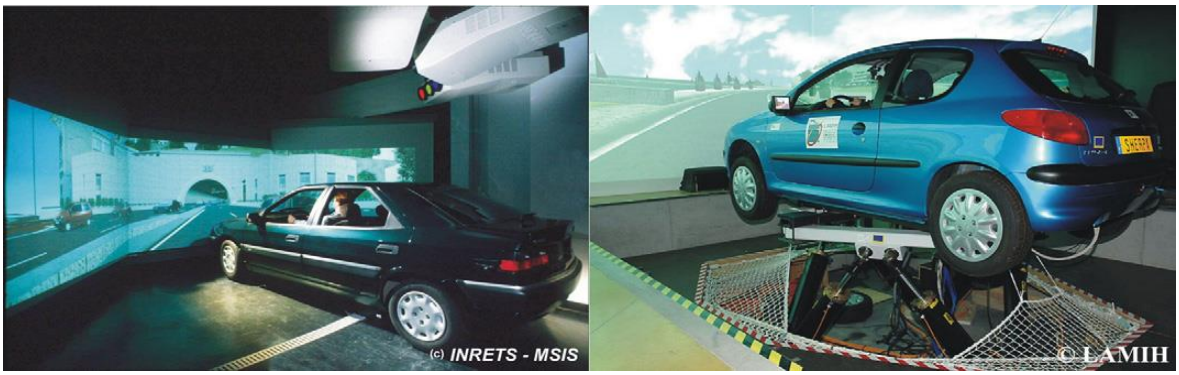
*Yazar: Adresi: Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya TÜRKİYE. E-mail: ccaliskan@sakarya.edu.tr, Telefon: +902642957034 Fax: +902642955601

Bu çalışmada bir sürücü simülatörü tasarımı ve sistem bileşenlerinin ekonomiklik açıdan karşılaştırılması yapılacaktır. Bu çalışmanın amaçlarından biri de meydana gelmesi muhtemel kazaların önüne geçmektir. Bu da sürücü kurslarındaki pratik eğitimlerin karayollarından ziyade sanal ortamlarda yani sürücü eğitimi için gerekli tüm bilgileri ve becerileri içeren bir güzergah tasarlanan simülatörlerde yapılması planlanmaktadır. Simülatörde yapılan eğitimler ayrıca karayollarında yapılan eğitimlerden daha ekonomik olacaktır. Aynı zamanda fosil yakıt ile çalışan içten yanmalı motor yerine elektrikli motorla çalışan hidrolik sistem veya sadece elektrik enerjisini benimseyen sistemler ile çok daha ekonomik bir şekilde pratik eğitimin ilk aşamasını vermek mümkündür. Böylece meydana gelmesi muhtemel kazaların önüne geçildiği gibi ciddi biçimde tasarruf da sağlanmış olacaktır.

2. Literatür Araştırması

Sürücü simülatörü konusunda dünya genelinde birçok çalışma mevcuttur.

Mesela bunlardan biri J. M. Auberlet, F. Rosey, F. Anceaux, S. Aubin, P. Briand, M. P. Pacaux, and P. Plainchault, tarafından 2011 yılında yayınlanan "The impact of perceptual treatments on driver's behavior: From driving simulator studies to field tests" başlıklı makalede yazarlar sürücülerin özellikle dağlık bölgelerde algı değişimlerinin sürücü davranışlarını nasıl etkilediğini gözlemlemişlerdir. Bunu yaparken bir simülatör üzerine vermek istedikleri algıları (tırtıklı şeritler, kasisler vs.) yüklemişler ve sonuçlarını paylaşmışlardır.[1]



Şekil 2. 1 Algıların Yüklendiği ve incelendiği Simülatörler[1]

Yine benzer şekilde David H. Weir, Dynamic Research, Inc., Torrance, CA, USA tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada simülasyon sistemlerinin araçlarda insan ile makinelerin nasıl etkileştiğini ve simülatör sistemlerinin gelişimini incelemiştir. [2]

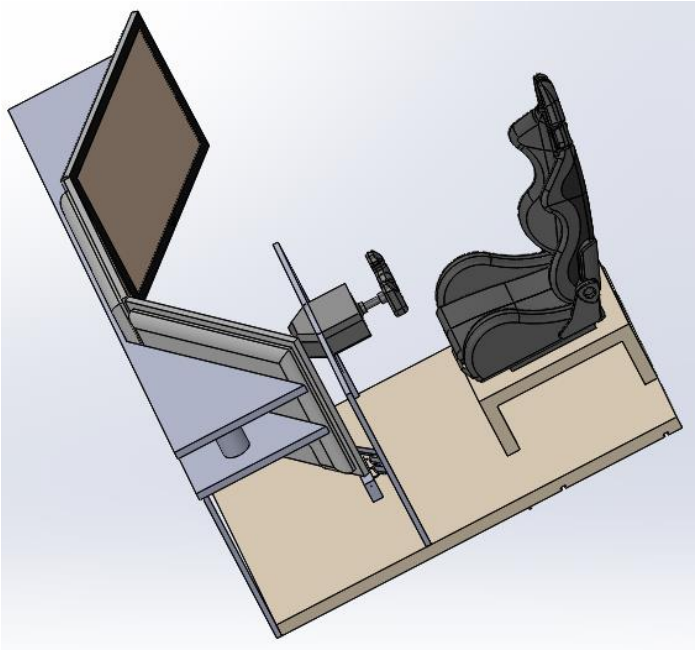
Padova Üniversitesi'nden R. Riccardo, G. Massimiliano, G. Gregorio, ve M. Claudio, tarafından yayınlanan 2012 tarihli "Comparative analysis of random utility models and fuzzy logic models for representing gap-acceptance behavior using data from driving simulator experiments," başlıklı makalede farklı modeller üzerinde ve sürücü simülatöründen alınan veriler çerçevesinde kavşaklarda geçiş önceliğinin sürücüler tarafından nasıl uygulandığını ele almıştır.[3]

3. Sürücü Koltuğu Simülatörlerinin Bileşenleri

Bu çalışmada tasarlanması düşünülen simülatör Mekanik, Hidrolik ve Elektronik Sistem ile Kontrol Ünitelerinden meydana gelecektir. Sistemin Mekanik tasarımı için gerekli kabuller yapılacak ve bu hesaplamalara göre diğer üniteler projelendirilecektir.

3.1. Mekanik Sistem

Mekanik sistem; simülatörün üzerinde bulunacağı platform, elektronik ve hidrolik ekipmanların bağlanacağı üniteler, sürücü koltuğu ve simülatör ekranından meydana gelecektir. Her biri için tasarlanan özel yerler bulunmakta ve bunların birbiriyle iletişimi en uygun şekilde sağlanmaktadır. Ayrıca hiçbir ekipmanın diğerini etkilemeyeceği şekilde bir yerleşim yapılmıştır. Bu sayede gayet kullanışlı bir tasarım olması amaçlanmıştır.



Şekil 3.1 Platform Üst Tablası ve Montajı

Mekanik tasarımın en önemli bileşeni ise sistemi taşıyan platformdur. Platformumuz altıgen bir düzlem üzerine 70 cm yükseklikte başka bir plakadan oluşmaktadır. İki plaka arasında hidrolik ve elektriksel sistemlerin ekipmanları bulunmakta, ayrıca gizlenmektedir. Üst plaka ve alt plaka 3 noktadan 6 silindir ile bağlantılıdır. Üst plakaya sürücü koltuğu montaj edilmiştir. Sürücü koltuğunun ön kısmında da üç ekran bulunmaktadır. Bu ekranlar sürücünün görüş açısında bulunan her şeyi gösterebilecek şekilde yerleştirilmiştir. Sistemimizde 3 noktadan yerleştirilmiş 6 hidrolik silindir bulunmaktadır. Bu silindirler sürücünün hareketine, görüntüye göre oransal olarak kontrol edilecek ve simülatörün hassas ve kesin sonuçlar vermesine katkıda bulunacaktır.

3.2. Hidrolik Sistem

Tasarımımızda temel hedef sistemin hidrolik enerjisi ile çalışmasına yöneliktir. Hidrolik sistemin temel bileşenleri ise hidrolik silindirler, valfler ve kontrol üniteleri ile güç ünitesidir.

Hidrolik silindirimiz simülatöre hareketi veren ve simülatörü kullananın hareketleri hissetmesini sağlayan sistem bileşenidir. Buradan hareketle sistemimizin çok hassas hareketlere cevap verebilmesi için öncelikle bir lineer cetvelli hassas çift etkili silindire ihtiyacı vardır. Lineer cetveli sayesinde silindirin hangi konumda olduğu bilgisi elektronik kontrol ünitesine anbean iletilecektir.

Sistemimizde en önemli bileşenlerden biri de silindirleri kontrol eden valflerdir. Bu valfler kullandığımız silindiri çalıştıracak şekilde olmalıdır. Piyasada oransal ve elektronik kart kontrollü selenoid yön kontrol valfleri bulunmaktadır. Sistemimiz için gereken de budur.

Hidrolik sistemi tasarlarken öncelikle sistemimizde kullanılacak olan tahmini yağ miktarını hesaplayalım. Bu hesaplamayı yapmak için bazı varsayımlarda bulunmamız gerekmektedir. [4]

Silindir içi çapını D_i=50 mm alırsak; (silindirlerin strok mesafesi 700 mm alınmıştır)

$$V_s = \frac{\pi \times 0{,}050^2}{4} 0{,}7 = 1{,}3744\ lt$$

Sistemimizde 6 silindir olduğu için $V_{6s} = 6 \times 1{,}3744 = 8{,}2424\ lt$ yağ gerekmektedir. Sistemde kullanılan hortumların iç çapını D_{hi}=19 mm alırsak ve 25 m hortum kullanırsak;

$$V_{hi} = \frac{\pi \times 0{,}019^2}{4} 25 = 7{,}0882\ lt$$

Hidrolik valf ve diğer ekipmanların yaklaşık 2 lt yağ alacağı varsayılırsa;

$$8{,}2424 + 7{,}0882 + 2 = 17{,}3306\ lt\ \cong 18lt$$

Sistemin genel yağ ihtiyacı 18 lt dir. Tankımızda 3 ila 5 kat yağ bulundurmalıyız. 50 lt yağ bulundurduğumuzu varsayıyoruz. Hidrolik yağın yoğunluğu 0,90 kg/lt'dir. Buradan yola çıkarak yağın kütlesi;

$$m_{yağ} = 50 \times 0{,}90 = 45\ kg \text{ dır.}$$

Tablo 3. 1 Sistem Bileşenlerinin Kütlesi

Sistemin Bileşenleri		Kütlesi (~kg)
Sürücü		150
Sürücü Koltuğu		30
Koltuk Tablası		20
Elektronik Ekipmanlar		45
Hidrolik Ekipmanlar	**Valfler**	15
	Güç Ünitesi	25
	Yağ	45
TOPLAM		330

Buradan yola çıkarsak sistemimiz yaklaşık 350 kg kütle kaldırabilme kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Kütleyi ağırlığa çevirirsek;

$$G = m \times g = 350 \times 9{,}81 = 3433{,}5\ N$$

Sistemimizde kullanacağımız pompanın 24 lt/dk debi, 2800 rpm, 65 bar (6,5 MPa) basınç ürettiği bilinmektedir. Buradan yola çıkarak ihtiyacımız olan yüzey alanını hesaplarsak;

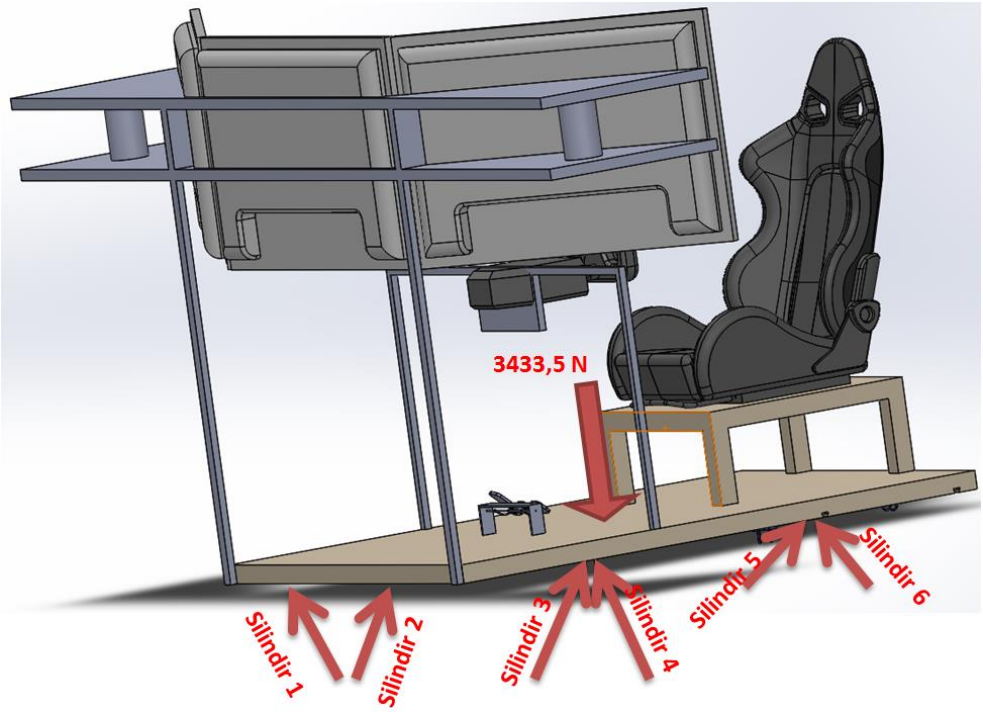
$$P_ç = \frac{G}{6A_s} \Rightarrow A_s = \frac{G}{P_ç} = \frac{3433{,}5}{6{,}5 \times 6} = 88{,}0385\ mm^2$$

Silindir alanımız 88,0385 mm^2'dir. Buradan piston çapına geçelim;

$$A_s = \frac{\pi {D_p}^2}{4} \Rightarrow D_p = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 88{,}0385}{\pi}} = 10{,}5875\ mm$$

Sistemimiz için 10,5875 mm çapında bir piston uygun görülmektedir. Standart mil çaplarından 28 mm çapındaki piston ile sistemimizde çalıştığımızda emniyet katsayısı yaklaşık olarak; 2,64 olmaktadır. Bu da sistemimizi oldukça güvenli ve emniyetli yapmaktadır.

Sistemdeki pistonlar yük karşısında bir eğilmeye maruz kalmaktadır. Bu eğilmeye karşı bir direnç uygulamaktadır. Sistemimizden istenen, üzerindeki yükü kaldırmasıyla birlikte o yük karşısında herhangi bir deformasyona uğramamasıdır. Bu sebeple seçilen ekipmanların dirençlerinin yükten fazla olması gerekmektedir. [5], [6]

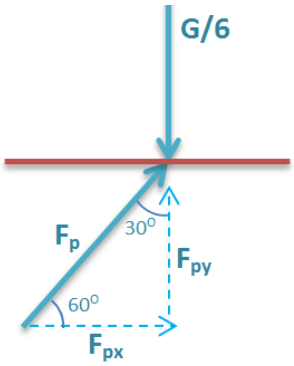


Şekil 3. 2 Sistem üzerine gelen yükün şematize edilmesi

Şekilde de görüldüğü gibi toplam kuvvetimiz olan 3433,5 N yük 6 silindir üzerine eşit bir şekilde dağılacaktır. Silindir başına;

$$\frac{3433{,}5}{6} = 572{,}5\ N$$

yük düşmektedir. Fakat silindirlerimiz dik olarak etkimediğinden bu kuvvetten daha fazla bir kuvvet silindirlere etkimektedir. Her bir silindirin platform ile 120° açı yaptığı düşünülerek aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3. 3 Piston kuvvetinin dağılımı

$$F_{py} = \frac{G}{6} = \frac{3433,5}{6} = 572,25\ N$$

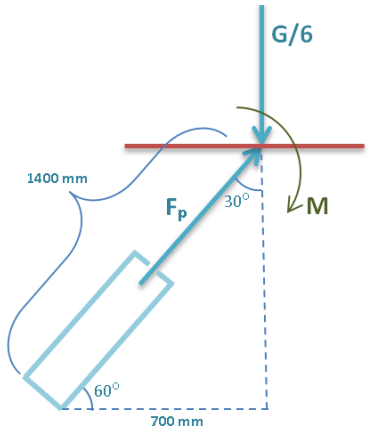
$$F_p = \frac{F_{py}}{\sin 60} = \frac{572,25}{\sin 60} = 660,7774\ N$$

Burada bulduğumuz F_p değeri yani bir pistonun kaldırması gereken kuvvet 660,7774 N'dur. Anlaşılıyor ki bir silindirimiz en az 660,7774 N kaldırma kapasitesine sahip olmalıdır. Sistemimiz için seçtiğimiz silindir ise çapı 50 mm olan, strok boyu 700 mm olan bir silindirdir. Sistemi besleyen pompa ise 65 bar basınç üretmektedir. Bu değerler ile silindirimizin üreteceği kaldırma kuvvetini hesaplarsak;

$$F = P \times A_s$$
$$F = 6,5 \times \frac{\pi \times 50^2}{4} = 12762,7202\ N$$

Her bir silindir ihtiyaç olandan yaklaşık 20 kat daha fazla kuvvet kaldırabilme kapasitesindedir. Bu da oldukça emniyetli bir sistem olduğunu gösterir.

Silindirlerin üzerine gelen kuvvetin oluşturacağı momenti de hesaplarsak;



Şekil 3. 4 Silindir üzerine gelen momentin temsili

Momentin Şekil 3.4'deki gibi etkidiği varsayıldığında;

$$M = \frac{G}{6} \times l = 572,25 \times 0,7 = 400,575\ Nm$$

değerinde moment etkir. Pistonumuzdan istenen başka bir özellik de bu momente karşı koyabilme kabiliyetidir. Momente karşı koyabilme kabiliyeti eğme mukavemeti olarak tanımlanır. Bir malzemenin eğme mukavemetini hesaplayabilmek için ise o maddenin eğme deneyi sırasında maruz kaldığı kuvvet ve deney düzeneğindeki parametrelere ihtiyacımız vardır.

Eğilme momentinin denklemi; $M_e = \frac{F \times l}{4}$ tür. Burada F, numuneyi eğmek için kullanılan kuvveti temsil eder. l ise eğme deneyinde kullanılan mesnetler arası uzaklıktır. Standart olarak deneylerde kullanılan numune çapı 16 mm olan bir silindir şeklinde numunedir. Tablodan baktığımızda bu numunenin eğme deneyindeki mukavemet değeri 630 N/mm^2'dir.[7] Eğme için gerekli kuvvet ise;

$$F = R \times A = 630 \times \frac{\pi \times 16^2}{4} = 126669{,}0158\ N$$

Buradan yola çıkarak eğme momenti:

$$M_e = \frac{F \times l}{4} = \frac{126669{,}0158 \times 80 \times 10^{-3}}{4} = 2533{,}380316\ Nm$$

buluruz. Bu da sistemimizin eğilme mukavemeti açısından 6 kattan daha fazla dayanıklı olduğunu gösterir.

3.3. Elektronik Sistem ve Kontrol Elemanları

Sistemimizde hidrolik ekipmanların kendi aralarındaki iletişim hidrolik sıvı yardımıyla olmasına rağmen hidrolik kontrol elemanları ile sistemin kontrol ünitesi arasındaki iletişim elektriksel sinyal ile gerçekleşmektedir.

Sistemimizde bir adet yüksek kapasiteli bilgisayar, 3 adet görüntüyü gösteren ekran, kumandayı sağlayan direksiyon ve pedallar ile kontrol kartlarının bulunduğu ünite bulunmaktadır. Bilgisayar üzerinde yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımı ekranlara yansıtmaktadır. Bu ekranda önceden belirlediğimiz ve dijital olarak modellediğimiz bir yol güzergahı bulunmaktadır. Araç sanal olarak o güzergahta ilerlerken yine bizim belirlediğimiz viraj, tümsek, çukur, bariyer gibi yol unsurları ile karşılaşmaktadır. Bu unsurlar karşısında aracın yapacağı hareketler önce elektriksel kısma aktarılır. Elektriksel bir komutla hidrolik sisteme gönderilir. Hidrolik sistem de silindirleri hareketlendirerek simülatörün o unsur karşısında aracın yapması gereken hareketi sürücüye hissettirir. Bu sinyal alışverişleri mümkün olan en kısa sürede gerçekleşir. Bu da yaklaşık 50 ms civarındadır. Dolayısıyla anlık olarak sürücü aracın ekranda görülen unsurlara karşı etkileşimini hissetmiş olur.

Sistemimizdeki sinyal akışı aşağıdaki şemada gösterilmiştir. Bu şemaya göre önce sinyal sağlayıcı görevi yapan direksiyon ve pedallar ile hareketin başlaması sağlanacaktır. Hareketin algılanması bir bilgisayar yardımıyla olacaktır. Bilgisayar alınan sinyalleri görüntü ile eşleşmesini yapacak ve aynı anda ekranda görüntü akışı sağlanacaktır. Bu sırada bilgisayar hidrolik sistemlere de gerekli sinyalleri göndererek sürücünün 3 boyutlu olarak konumunu şekillendirecektir. Bu şekilde hareketin devamı sağlanacak ve sürekli bir döngü ile simülatör istenen hareketlere göre sistemin konumunu ve görüntü akışını sağlayacaktır.

Şekil 3.5 Sinyal Akış Şeması

4. Sistem Bileşenlerinin Ekonomik Karşılaştırılması

Tasarlanması düşünülen sistem öncelikle hidrolik sistem olarak düşünülmüştür. Ancak hidrolik tahrik elemanları yerine Elektrik servo motorlar kullanılabilir. Bu çalışmada hem elektrikli servo motor kullanıldığında hem de hidrolik sistemi kullanıldığında simülatörün ekonomikliği karşılaştırılacaktır. Bu nedenle Elektrikli servo ve Hidrolik Sistemlerde kullanılan hareketi veren yani tahrik edici bileşenlerin piyasada fiyatları araştırılmış ve aşağıda tablo halinde verilmiştir. Ayrıca güç sarfiyatı açısından da sistemler karşılaştırılmış ve ekonomik olan sistem tespit edilmiştir.

Tablo 4.1 Hareket Veren Sistemin Bileşenlerinin Fizibilitesi

	Hidrolik Sistem				Elektrikli Sistem		
1	Hidrolik Lineer Cetvelli Silindir	6 Ad	¨ 8.000,00		Elektrik Servo Motorlu Silindir	6 Ad	¨ 85.000,00
2	Hidrolik Selenoidli Oransal Valf	6 Ad	¨ 10.000,00		Servo Motor Sürücüsü	6 Ad	¨ 45.000,00
3	Hidrolik Güç Ünitesi (Power Pack)	1 Ad	¨ 2.500,00		-		
4	Hidrolik Oransal Valf Kartı	6 Ad	¨ 7.500,00		-		
5	Hidrolik İlave Malzemeler		¨ 5.000,00		-		
6	Hidrolik Hortum		¨ 800,00		Elektrik Kablosu		¨ 3.000,00
7	Hidrolik Yağ		¨ 400,00		-		
8							
9							
10							
			TOPLAM ¨ 34.200,00				**TOPLAM** ¨ 133.000,00

Harcanan enerji olarak kıyas yapmak istediğimizde ise karşımıza şu tablo çıkmaktadır:

Tablo 4.2 Hidrolik ve Elektrikli Sistemin Enerji Tüketimi

No	Hidrolik Sistem	Enerji
1	Pompayı Çalıştıran Motor	**3 KW**
2	Elektronik Kartlar için enerji	**max 1 KW**
3		
4		
	Toplam	**4 KW**

No	Elektrikli Sistem	Enerji
1	Elektrikli Silindirler (750Wx6)	**3,5 KW**
2	Sürücüler (~1000Wx6)	**6 KW**
3		
4		
	Toplam	**9,5 KW**

Elektrik birim fiyatının 0,373586 ¨ /KWh olduğu, günde 12 saat çalışarak yılda 250 gün faaliyet gösterdiği kabul edilirse;

Hidrolik sistem: $250 \times 12 \times 4 \times 0{,}373586 = 4.483{,}03$ ¨ /yıl
Elektrikli sistem: $250 \times 12 \times 9{,}5 \times 0{,}373586 = 10.647{,}20$ ¨/yıl şeklinde enerji sarfiyatı ortaya çıkar.

5. Sonuç

Sürücü kurslarında çalışan standart bir aracın yılda yaklaşık ¨ 12.000 yakıt harcadığı bilinmektedir. Bununla birlikte araçların senede en az 1 defa ¨ 1.000'ye yakın bakım masrafları olduğu ve aracın sigorta ile vergi masrafları olduğu bilinmektedir. Tüm bu bilgilerin yer aldığı karşılaştırmalı tablo aşağıdaki gibidir:

Tablo 4.3 Ücret Bilançosu

	Hidrolik Sistem ile Çalışan Simülatör	Elektrikli Sistem ile Çalışan Simülatör	İçten Yanmalı Motora Sahip Araç
Satış Ücreti	¨ 110.000,00	¨ 210.000,00	¨ 40.000,00
Yıllık Harcadığı Enerji Maliyetinin Yaklaşık Değeri	¨ 6.500,00	¨ 12.500,00	¨ 12.000,00
Yıllık Bakım Masrafı	¨ 500,00	-	¨ 1.000,00
Sigorta ve Vergiler	-	-	¨ 1.200,00

Yaklaşık fiyatlardan oluşturduğumuz tablodan da anlaşılacağı gibi hidrolik sistemli simülatör, elektrik enerjili simülatöre göre çok daha uygun fiyatlıdır. Kıyas yaptığımız bir diğer nokta olan normal araç değerleri simülatörlerden düşük gibi gözükse de araçların her biri için çalıştırılması gereken personel hesaba katılmamıştır. Ayrıca yine tek araç baz alınarak hesap yapılmıştır.

Bir simülatörün 4 normal içten yanmalı motora sahip aracın yerini tuttuğu varsayılırsa senelik takribi olarak ¨ 42.000 tasarruf sağlanmış olur. Bu tasarruf 2-3 sene içerisinde sistemin kendini amorti etmesi anlamına gelmektedir.

Simülatör kullanıldığında gerek zaman gerekse mekan açısından birden fazla aracın yerini tutabilecek verim alındığı da düşünülerek simülatör ile ön eğitim yapılmasının çok daha uygun, güvenli ve ekonomik olduğu görülmüştür.

Kaynaklar

[1] J. M. Auberlet, F. Rosey, F. Anceaux, S. Aubin, P. Briand, M. P. Pacaux, and P. Plainchault, “The impact of perceptual treatments on driver’s behavior,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 45, pp. 91–98, 2012.

[2] D. H. Weir, “Application of a driving simulator to the development of in-vehicle human–machine-interfaces,” *IATSS research*, vol. 34, no. 1, pp. 16–21, 2010.

[3] R. Riccardo, G. Massimiliano, G. Gregorio, and M. Claudio, “Comparative analysis of random utility models and fuzzy logic models for representing gap-acceptance behavior using data from driving simulator experiments,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 54, pp. 834–844, 2012.

[4] İ. Karacan, *Endüstriyel Hidrolik*. 1987.

[5] F. P. Beer and R. Johnston, *Mechanics of Materials*. 1992.

[6] M. İnan, *Cisimlerin Mukavemeti*. 1984.

[7] M. G. Kutay, “Mukavemet Değerleri Formüller Ve Tablolar.” .