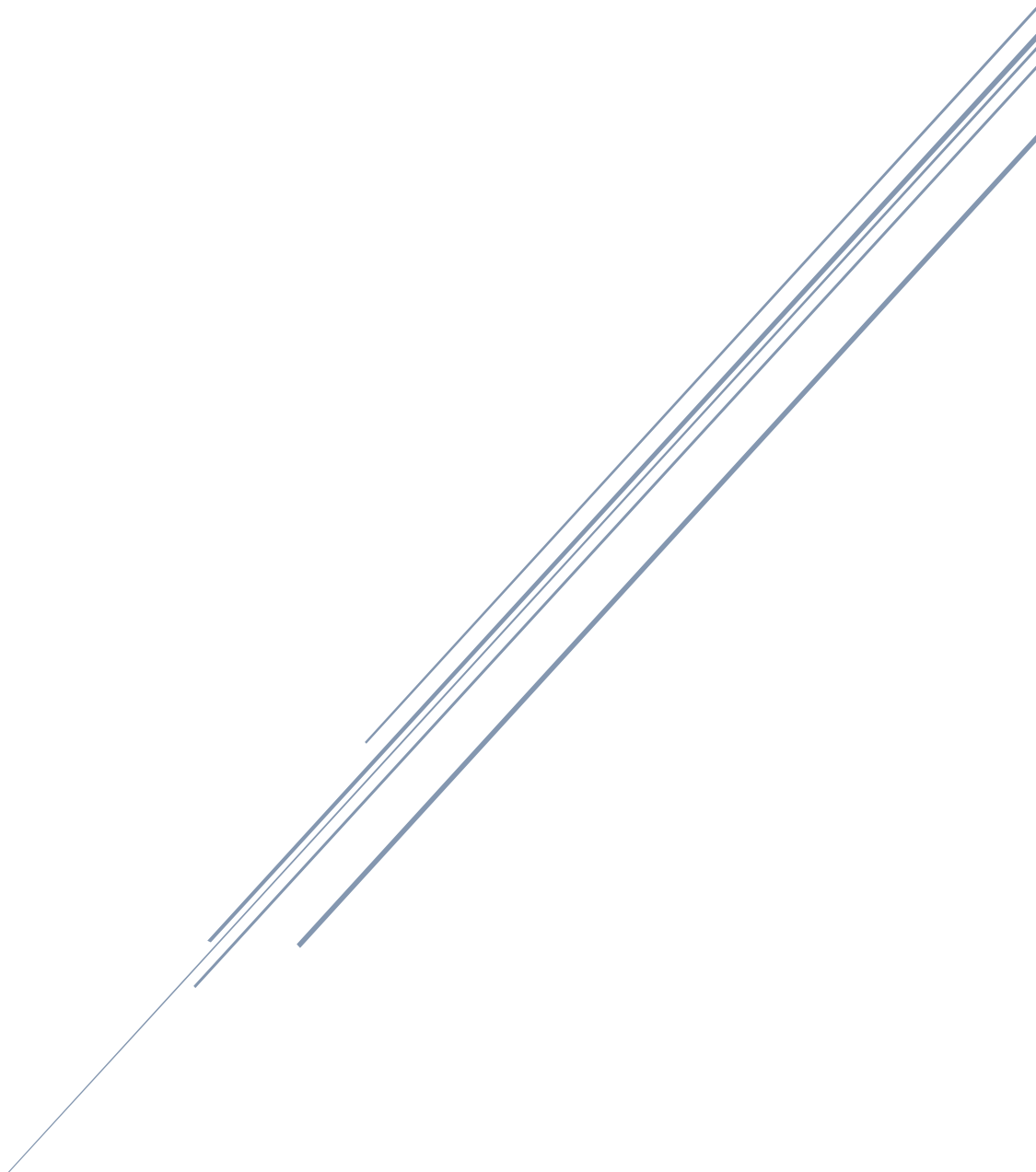


SİSTEM TANIMA

Final Projesi



Ertuğrul Keçeci | 504191112
Mustafa Caner Sezer | 504191123

İçindekiler

Giriş.....	2
Matematiksel Denklemler	4
Kontrolör Tasarımı.....	5
Elektriksel Kısım Kontrolü	5
Mekanik Kısım Kontrolü	6
Sistem Tanıma	8
χ^2 Testi	11
Korelasyon Testleri	14
Sonuçlar	20

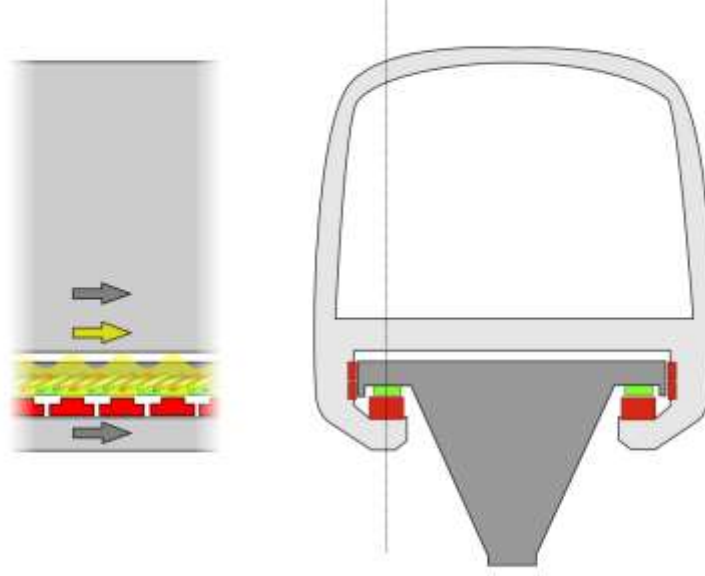
Giriş

Manyetik levitasyon treni (maglev) “MAGLEV” sözcüğü İngilizce “magnetic levitation” sözcüklerinin kısaltılmasıyla elde edilmiş, yani “manyetik olarak havada tutma, yükseltme” anlamına gelir.

Maglev sistemlerin tarihçesinden biraz bahsedecek olursak, 1940'ların sonlarında, Imperial College London'da profesör olan İngiliz elektrik mühendisi Eric Laithwaite, lineer asenkron motorun ilk tam boyutlu çalışma modelini geliştirdi. 1964'te Imperial College'da elektrik mühendisliği profesörü oldu ve burada lineer motoru başarılı bir şekilde geliştirmeye devam etti. 1970'lerin başında Laithwaite, tek bir lineer motorun hem kaldırma hem de ileri itme üretmesine olanak tanıyan ve tek bir mıknatıs setiyle bir maglev sisteminin kurulmasına izin veren yeni bir mıknatıs düzenlemesi, manyetik nehri keşfetti. İlk ticari maglev insan taşıyıcısı basitçe "MAGLEV" olarak adlandırıldı ve resmi olarak 1984'te Birmingham, İngiltere yakınlarında açıldı. 42 km / saate varan hızlarda çalışan, Birmingham Havaalanı ve Birmingham Uluslararası tren istasyonu arasındaki monoray yolunun yükseltilmiş 600 m'lik bölümünde işletildi. Sistem, güvenilirlik sorunları nedeniyle 1995 yılında kapatıldı.

Günümüzde MAGLEV sistemleri farklı ülkelerde kullanılmaktadır. Maglev araçların diğer trenlere göre bazı avantajları bulunmaktadır. Maglev trenler, birkaç hız rekoru kırmıştır ve maglev trenleri geleneksel trenlerden çok daha hızlı hızlanıp yavaşlayabilir; tek pratik sınırlama yolcuların güvenliği ve rahatlığıdır. İlk kurulum maliyeti oldukça yüksek olan maglev trenleri henüz sadece üç ülkede aktif olarak çalışmaktadır. Bu ülkeler Kore, Japonya ve Çin'dir. Yüksek hızlı maglev treni ise sadece Çin'de kullanımdadır. Çin'deki bu tren saatte 430 km/saat hıza ulaşp 30 kilometrelik mesafeyi 8 dakikada alabilmektedir. Yaygın olmama nedenleri tekrar maliyet ve muhtemel bir güvenlik riski olarak sıralanabilir. Avantajı ise geleneksel trenlere göre oldukça hızlı hızlanıp yavaşlayabilmesi, daha hızlı olması olarak sıralabilir.

Elektromanyetik süspansiyon sistemine sahip MAGLEV trenine ait bir gösterim aşağıda görülebilir. Burada yeşille gösterilen kısım elektromanyetik alanı oluşturan kısımdır ve raylara bağlıdır. Burada oluşan enerjiyle tren aşağı itilerek trenin havada gitmesi sağlanır.

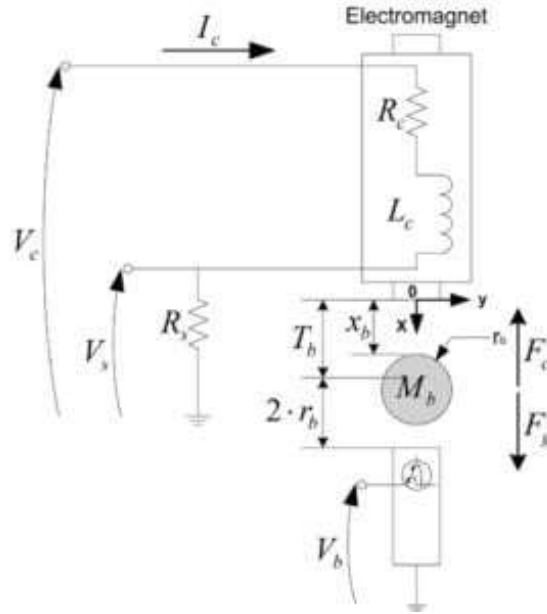


Sistem tanıma projesi için bu sistemi simüle eden Quanser marka simülatör kullanılacaktır. Bu simülatör aşağıda görülebilir. Sisteme giriş olarak volt verilerek elektriksel devre yardımıyla bu gerilim manyetik alana çevrilmektedir. Simülatörün üstündeki bobinle bu alan oluşturulmaktadır. Aşağıda bir bilye ve bu bilyenin konumunu ölçen bir sensör bulunmaktadır.



Matematiksel Denklemler

Yukarıda bulunan Quanser sistemine ait şema şu şekilde gösterilebilir,



Sistem modellemeye elektriksel kısımdan başlayabiliriz.

$$V_c(t) = I_c(t)R_c + L_c \frac{dI_c}{dt} \quad (1)$$

Ardından Newton'un ikinci yasasından aşağıdaki ifade elde edilir,

$$\frac{d^2 x_b}{dt^2} = f(x_b, I_c) = \frac{M_b g x_b^2 - K_m I_c^2}{M_b x_b^2} \quad (2)$$

Sistemin denge noktası, iki kuvvetin birbirine eşit olduğu nokta olarak şu şekilde gösterilebilir,

$$\sum F = (F_g - F_{m_{x_{b0}, I_{c0}}}) = 0 \quad (3)$$

Elde edilen denge noktasında akımı veren ifade,

$$I_{c0} = x_{b0} * \sqrt{\frac{M_b * g}{K_m}} \quad (4)$$

Elimizde bulunan denge noktasına ait milimetre cinsinden ifadeyi yerine yazdığımızda denge noktasındaki akım buradan bulunabilir.

$$(I_{c0}) = 0.6418 [A] \quad (5)$$

Denge noktasında akım ve konum bulunduktan sonra burada Taylor serisi açılıp denklemler lineerleştirilebilir.

$$s^2 \Delta x_b = \frac{\partial f(x_{b0}, i_{c0})}{\partial x_b} \Delta x_b + \frac{\partial f(x_{b0}, i_{c0})}{\partial i_c} \Delta i_c \quad (6)$$

Denklemler sadeleştirilirse,

$$\frac{\Delta x_b}{\Delta i_c} = \frac{-\frac{2g}{i_{c0}}}{s^2 - \frac{2g}{x_{b0}}} \quad (7)$$

Sistem parametreleri yerine konursa,

$$\frac{\Delta x_b}{\Delta i_c} = \frac{-28.91}{s^2 - 2842} \quad (8)$$

Olacak şekilde sistemin transfer fonksiyonu elde edilir.

Kontrolör Tasarımı

MAGLEV sistemleri yapısı gereği açık çevrimde kararsızdırlar. Dolayısıyla tanıma işleminin yapılabilmesi için önce kararlı hale getirilmeleri gerekmektedir. Bunun için kontrol işlemi iki farklı yapıda ele alınmıştır. Bunlardan ilki elektriksel kısmın kontrolü, ikinci kısmı mekanik kısmın kontrolüdür.

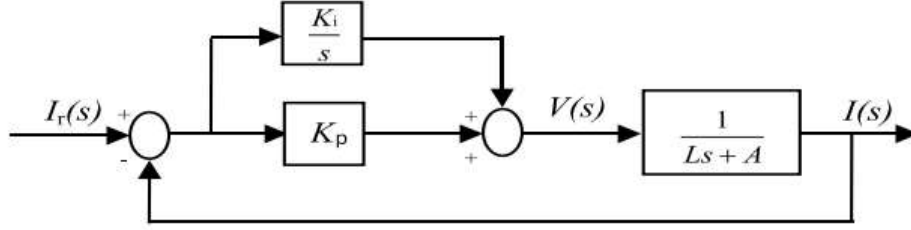
Elektriksel Kısım Kontrolü

Öncelikli olarak sistemin elektriksel kısmının transfer fonksiyonunu elde edilmiştir.

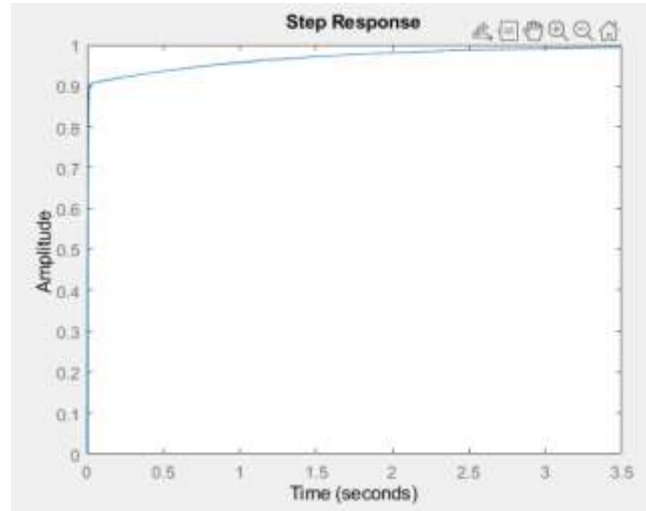
$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{1}{0.4125s + 11} \quad (9)$$

Elde edilen bu transfer fonksiyonun bir PI kontrolör ile iç çevrime alınarak çok hızlı bir şekilde referansı takip etmesi sağlanmıştır. Oluşturulan PI kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$PI_{in}(s) = \frac{100.705s + 89.1}{s} \quad (10)$$



Sisteme ait blok diyagramı yukarıdaki gibidir ve sistem yanıtı da aşağıda görülebilir. Elektriksel kısım o kadar hızlıdır ki, bazı çalışmalarda bu kısmın transfer fonksiyonu 1 olarak kabul edilmiştir.



Mekanik Kısım Kontrolü

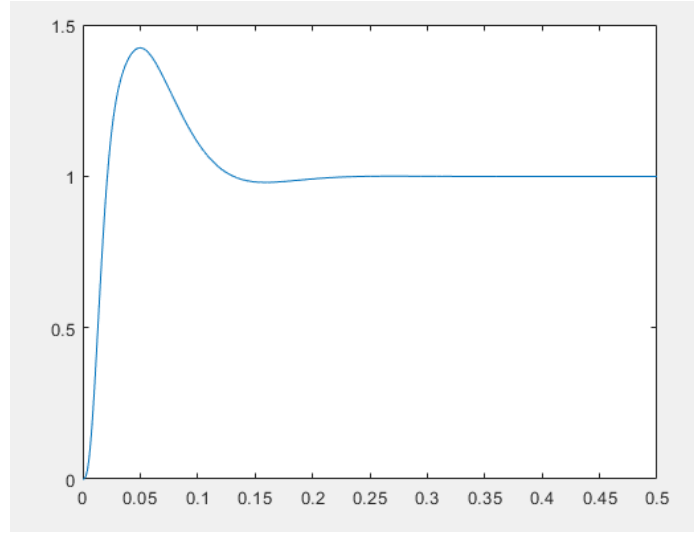
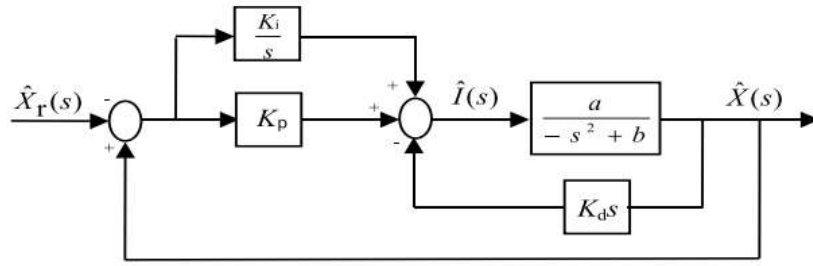
Sistemin mekanik kısmı için ise daha önce çalışma noktalarımızda doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonunu elde etmiştik.

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{-28.91}{s^2 - 2842} \quad (11)$$

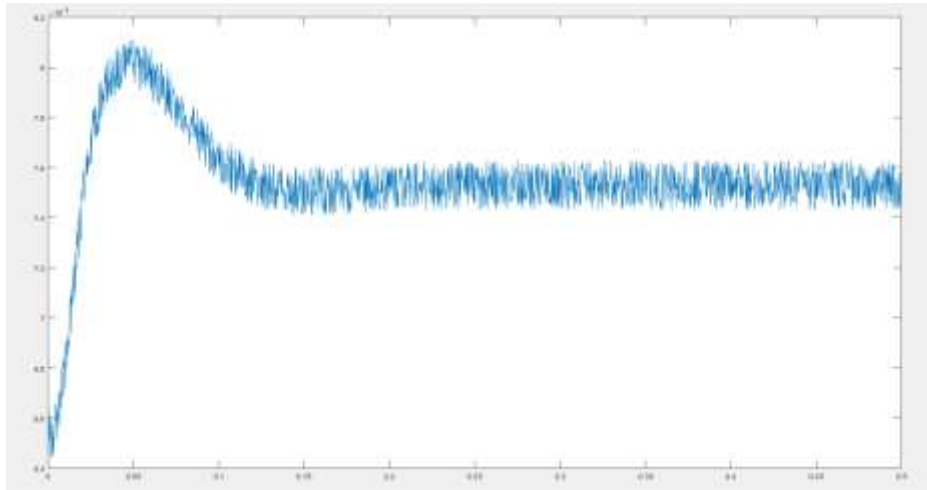
Sistemin transfer fonksiyonunun görüldüğü üzere sağ yarı düzlem üzerinde kutbu bulunmakta ve bu sebeple kararsız bir davranış sergilemektedir. Sistemi kararlı kılabilmek için PI-D yapısı ile kontrolör tasarlanmış ve sistemin kararlı bir davranış sergilemesi sağlanmıştır.

$$PI_{out}(s) = \frac{518s + 10328}{s}, \quad D(s) = -8.75s \quad (12)$$

Aynı şekilde sisteme ait blok diyagramı ve sistem yanıtı da aşağıda görülebilir.

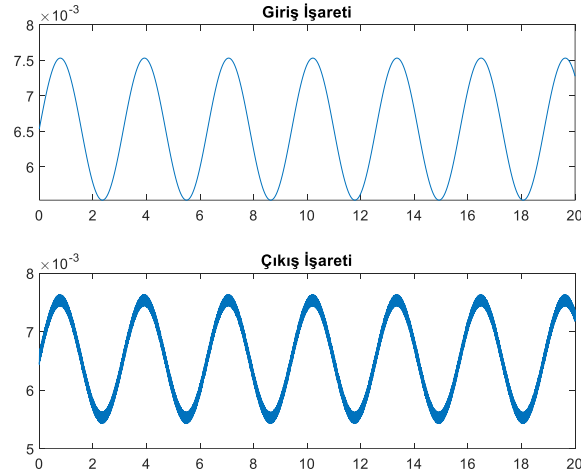


Lineerleştirilmiş sisteme gürültü ekleyerek sistem yanıtı incelenmiştir. Görüldüğü üzere sistemin denge noktasından başladığı ve 1mm’lik basamak girişe lineerleştirilmiş sistemin yanıtında gördüğümüz gibi ~%40 aşım yaparak yerleşmiştir.

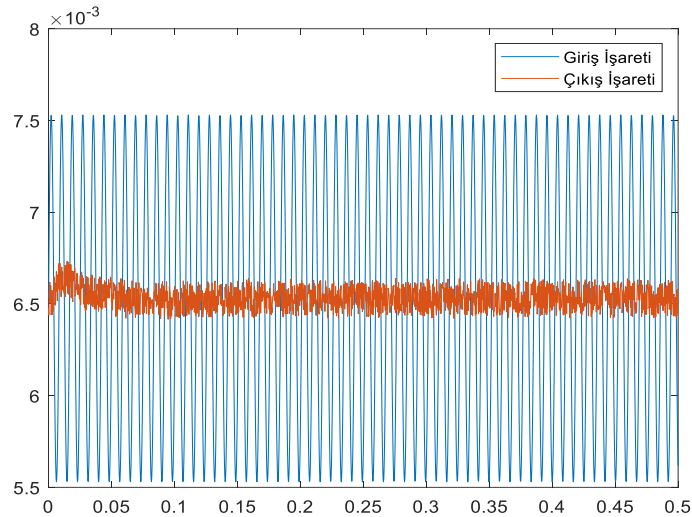


Sistem Tanıma

Sistemi tanımaya ilk olarak ön deneyler yapılarak başlanmıştır. Sisteme farklı genliklerde sinüs dalgaları verilerek, sisteme verilecek giriş işaretinin alabileceği maksimum genlik bulunmuştur. Sisteme maksimum 1mm genlikli sinüs dalgası verildiğinde sistem yaklaşık lineer davranış göstermiştir.



Bu noktadan sonra sistemin kesim frekansını bulabilmek için giriş işaretinin frekansı arttırılmış ve çıkış genliğinin %1 değerine düşmesi aranmıştır. Bu deney yapıldıktan sonra sistemin örnekleme frekansı 400Hz olarak alınmıştır.



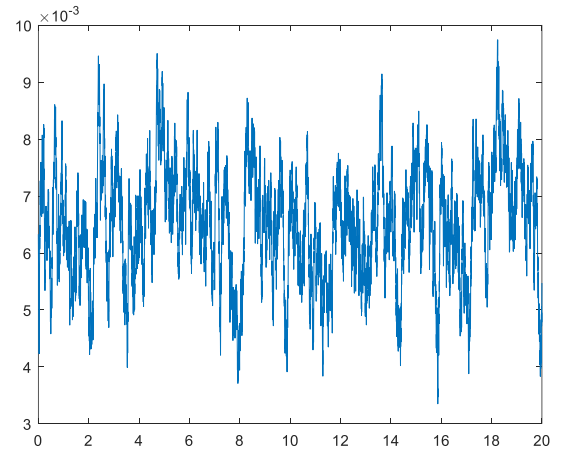
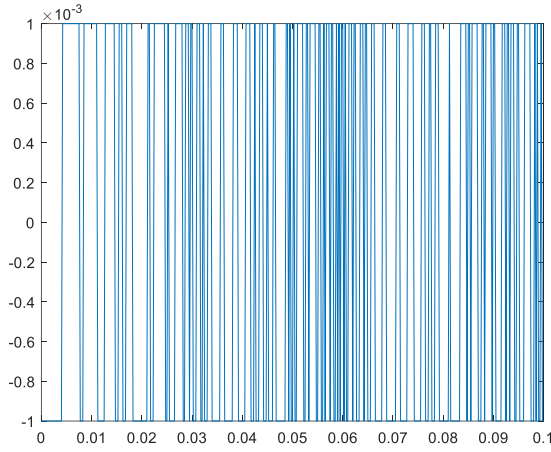
$$T = 0.0025$$

(13)

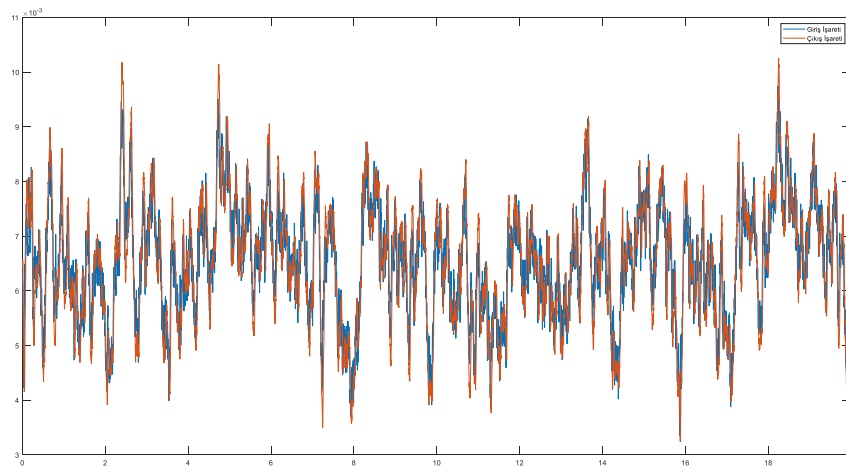
Sistemin giriş işareti olarak PRBS işareti seçilmiştir. Örnekleme periyodu 0.0025 olduğu için, 20 saniye boyunca devam eden 8001 verilik bir PRBS işareti oluşturulmuştur. Fakat sistemimizin geçici hal davranışı çok hızlı bir şekilde gerçekleştiği için düşük frekanslarda zengin bir işaret elde etmemiz gerekiyordu. Bunu sağlayabilmek için seviye değişiminin olasılığı azaltılmış ve bunu sağlayan filtre yapısı kullanılmıştır. Filtre denklemi, filtre öncesi üretilen giriş işareti ve filtreden sonra çıkan işaret aşağıda görülebilir.

$$H(q^{-1}) = \frac{(1 - 0.98^2)^{0.5}}{1 - 0.98q^{-1}} \quad (14)$$

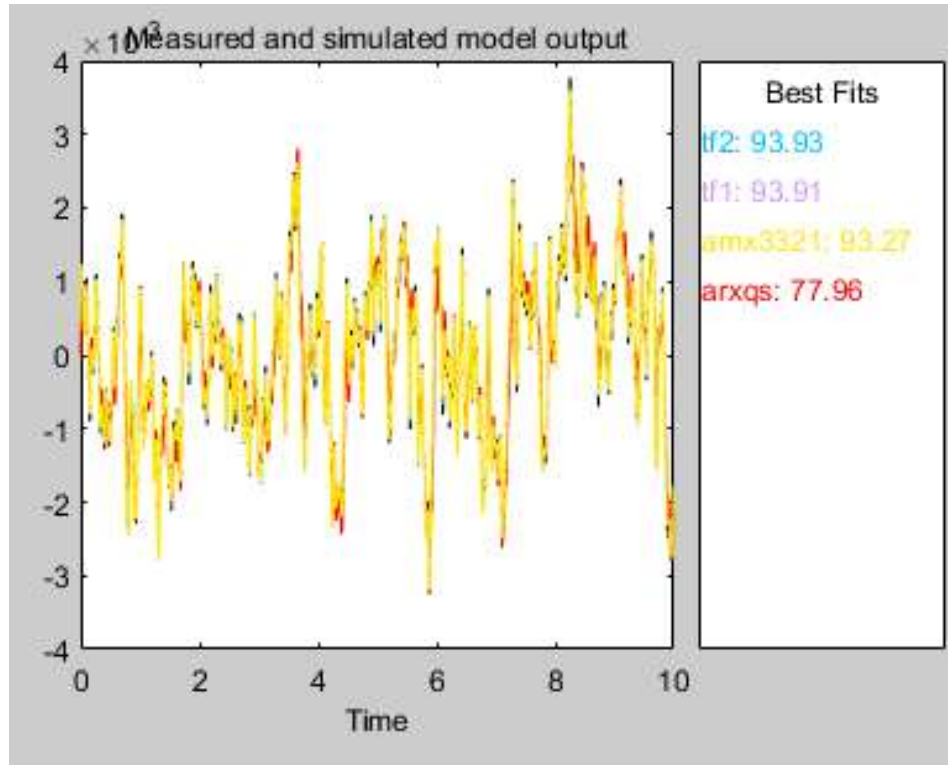
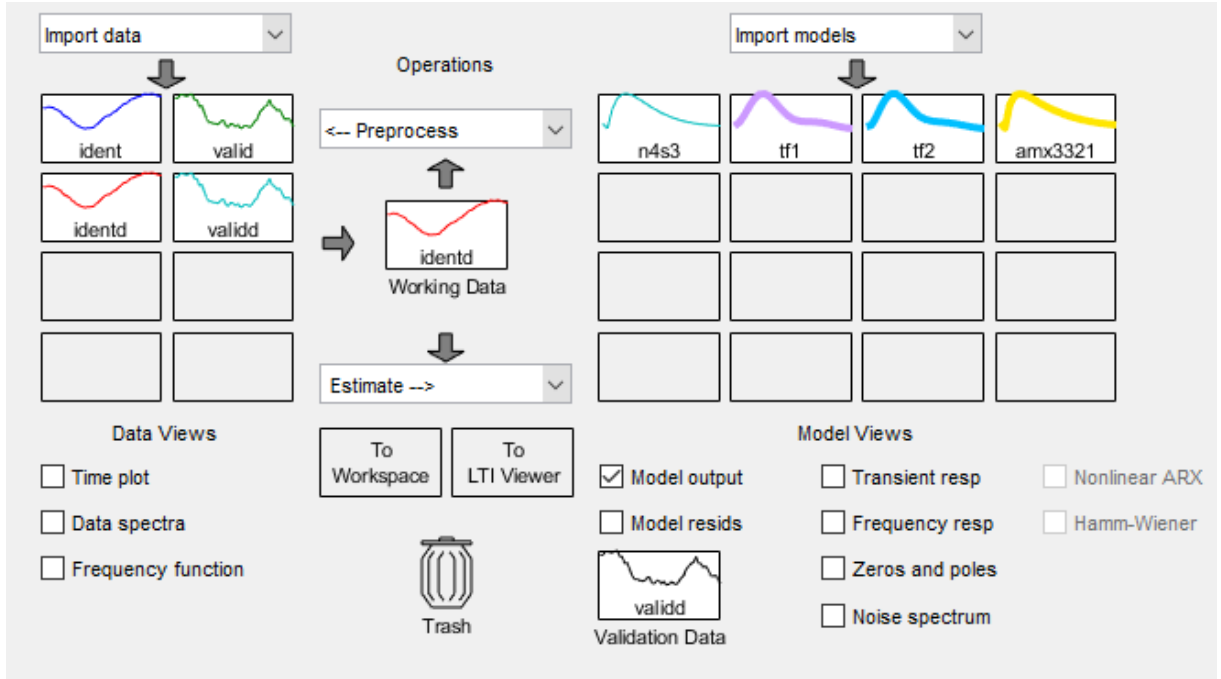
Filtre yapısından da görüldüğü üzere alfa parametresi 0.98 olarak seçilmiş ve işaretin %98 olasılıkla bir önceki değerinde kalması istenmiştir.

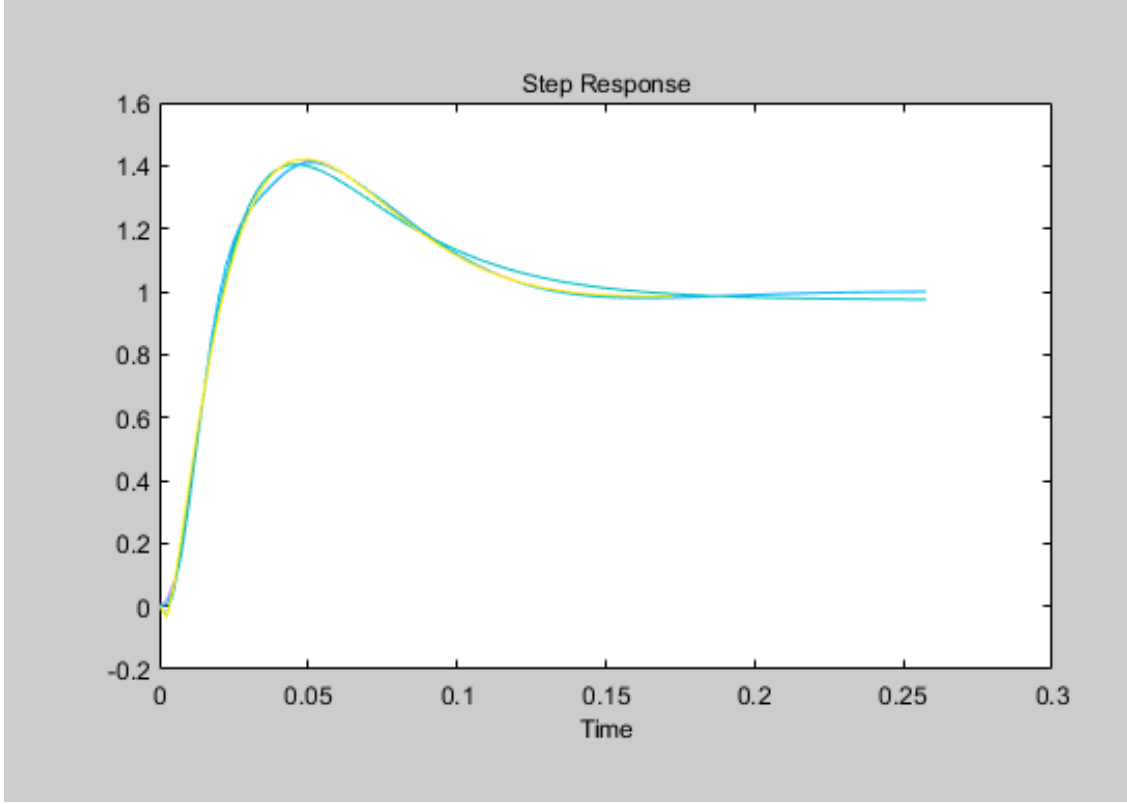


Bu giriş işareti sisteme uygulandığında aşağıdaki çıkış elde edilmiştir.



Oluşturulan veriler ve sistem tanıma toolbox'ı kullanılarak uygun bir model yapısı bulunmaya çalışılmıştır. Oluşturulan model yapıları ve ilgili model yapılara ait sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.





Elde edilen tf1 ve tf2 modellerine ait transfer fonksiyonları aşağıda gösterilmiştir.

$$tf1(z^{-1}) = \frac{0.02044 z^{-1} - 0.01946 z^{-2}}{1 - 3.883 z^{-1} + 6.166 z^{-2} - 5.013 z^{-3} + 2.08 z^{-4} - 0.349 z^{-5}} \quad (15)$$

$$tf2(z^{-1}) = \frac{0.006004 z^{-1} + 0.03918 z^{-2} - 0.005747 z^{-3} - 0.03516 z^{-4}}{1 - 2.306 z^{-1} + 1.01 z^{-2} + 1.508 z^{-3} - 1.746 z^{-4} + 0.5372 z^{-5}} \quad (16)$$

Bu iki transfer fonksiyonu üzerinden hangi modelin seçileceğini belirlemek için en uygun seçenek χ^2 testini uygulamak olacaktır.

χ^2 Testi

χ^2 testini uygulamak için öncelikle kullanılan veri sayısını, iki modelin değer fonksiyonlarının aldığı değeri ve parametre sayılarını belirlemek gerekir.

$$V(\theta)_{tf1} = 4.723e - 09 \quad (17)$$

$$V(\theta)_{tf2} = 4.663e - 09 \quad (18)$$

$$n_1 = 7, \quad n_2 = 9, \quad N = 8000 \quad (19)$$

İki modelin parametre sayısı arasındaki farkın 2 olduğu görülmektedir. χ^2 testinde genellikle alfa parametresinin 0.05 seçildiği göz önüne alınırsa, parametre sayısı fazla olan modeli kullanmak için aşağıdaki eşitsizliğin sağlanması gerekmektedir.

$$f = \frac{V_1 - V_2}{n_2 - n_1} \frac{N - n_2}{V_2} < \chi_{0.05}^2(2) \quad (20)$$

Burada eşitsizliği sağ tarafındaki değeri bulmak için χ^2 fonksiyonunun aldığı değerleri gösteren tablodan yararlanılır.

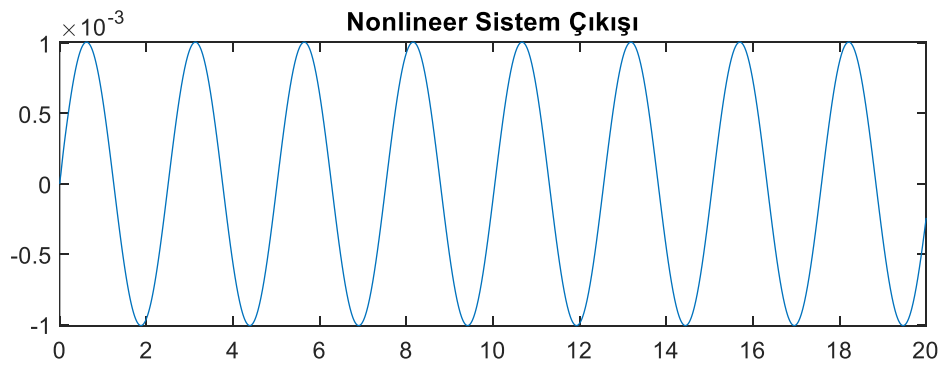
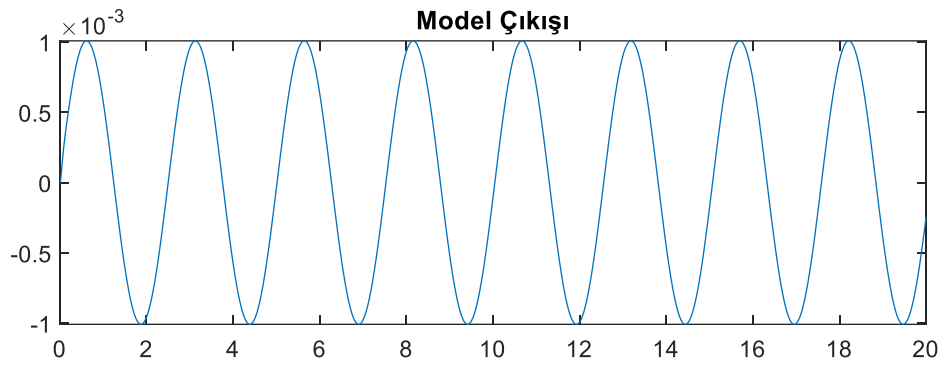
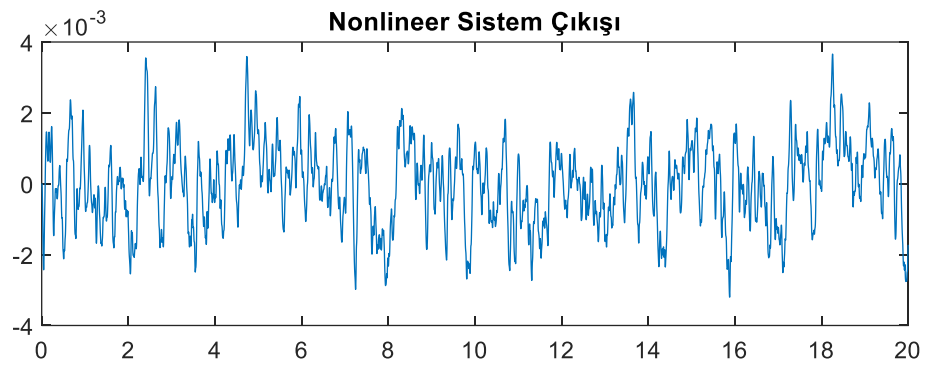
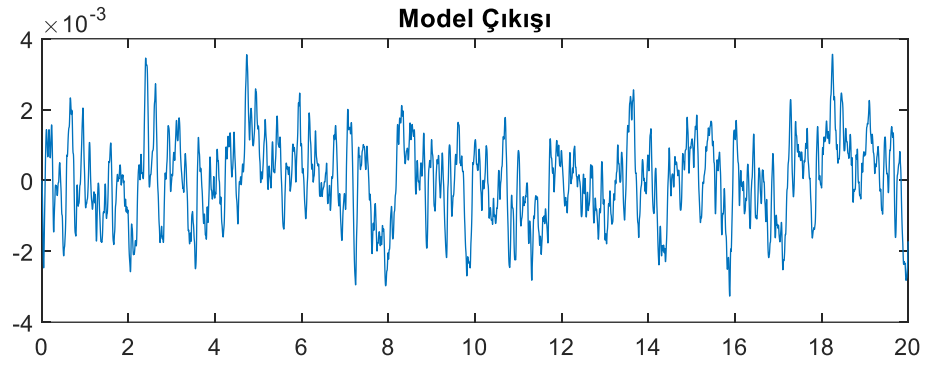
TABLE B.1 Numerical values of $\chi_{\alpha}^2(n)$

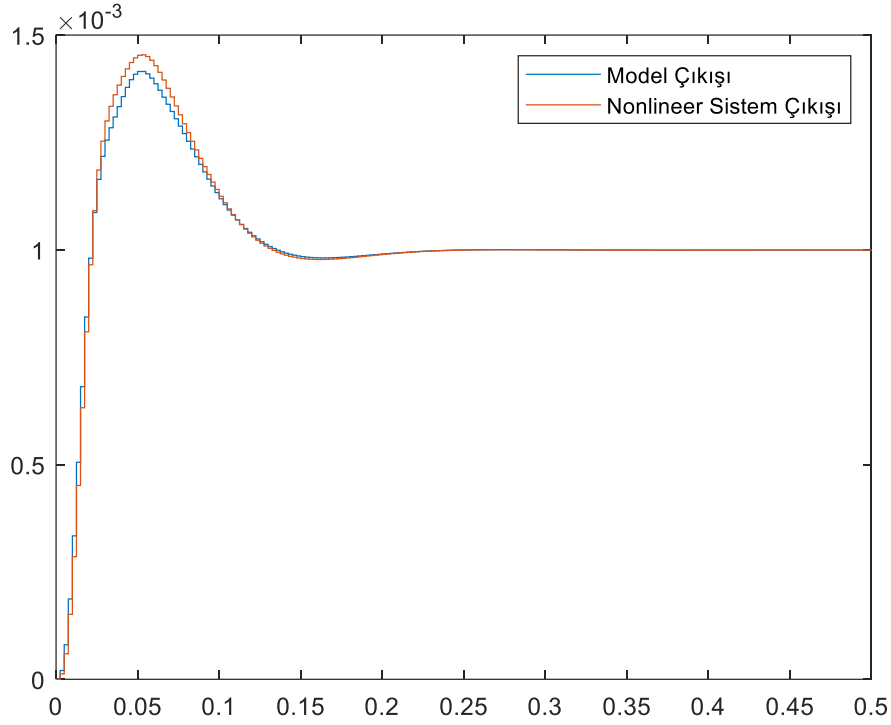
α	0.05	0.025	0.01	0.005
n				
1	3.84	5.02	6.63	7.88
2	5.99	7.38	9.21	10.6
3	7.81	9.35	11.3	12.8
4	9.49	11.1	13.3	14.9
5	11.1	12.8	15.1	16.7
6	12.6	14.4	16.8	18.5
7	14.1	16.0	18.5	20.3
8	15.5	17.5	20.1	22.0
9	16.9	19.0	21.7	23.6
10	18.3	20.5	23.2	25.2
11	19.7	21.9	24.7	26.8
12	21.0	23.3	26.2	28.3
13	22.4	24.7	27.7	29.8
14	23.7	26.1	29.1	31.3
15	25.0	27.5	30.6	32.8
16	26.3	28.8	32.0	34.3
17	27.6	30.2	33.4	35.7
18	28.9	31.5	34.8	37.2
19	30.1	32.9	36.2	38.6
20	31.4	34.2	37.6	40.0

Tablodan okunulduğu üzere yukarıda belirtilen denklemin sol tarafının değerinin 5.99 değerinden küçük olması beklenmektedir.

$$f = \frac{0.060e - 09}{2} \frac{7991}{4.663e - 09} = 54.36 \quad (21)$$

Böylelikle eşitsizliğin sağlanmadığını görebilmekteyiz. Elde edilen model; PRBS, sinüzoidal ve basamak girişleri altında doğrusal olmayan sistem ile karşılaştırılmıştır.

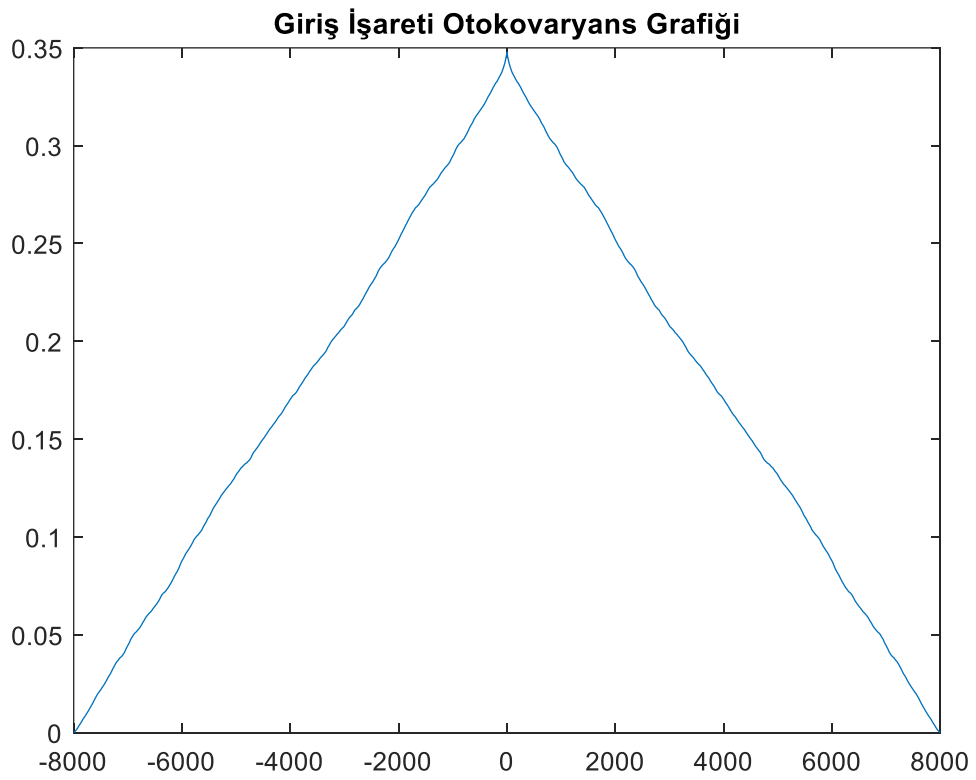
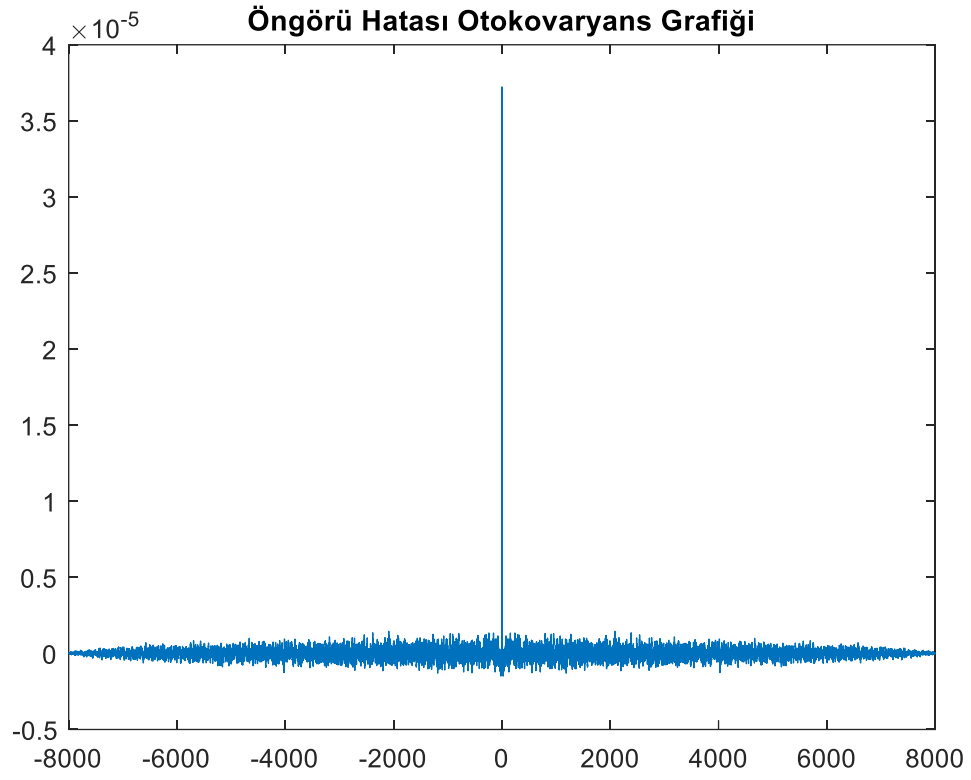


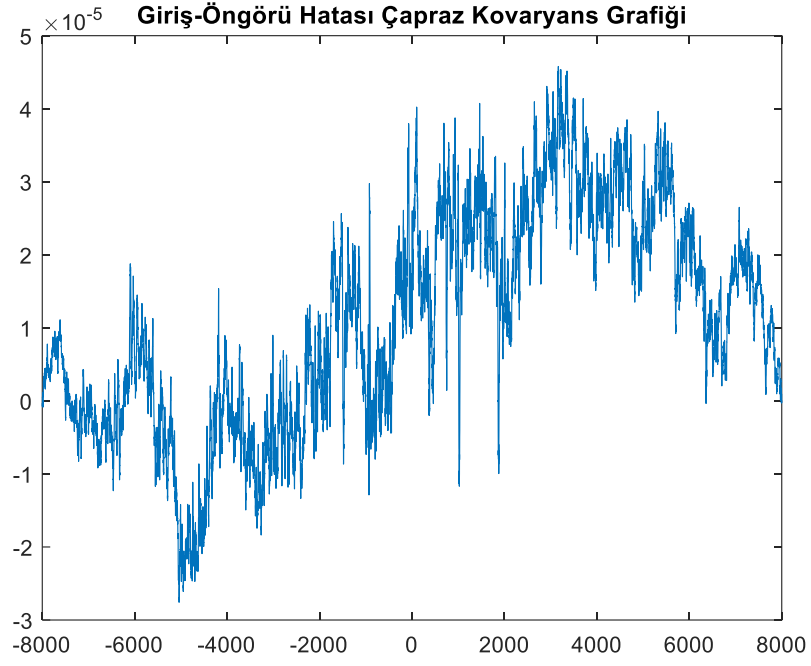


Farklı giriş altındaki model ve nonlinear sistemin yanıtlarının birbirlerine çok fazla benzerlik gösterdiği görülmektedir. Böylelikle elde edilen modelin sistem dinamiklerini başarılı bir şekilde temsil ettiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte, modelin doğruluğunu belirleyen hipotezler ve bu hipotezlere ait testler vardır.

Korelasyon Testleri

Modeli doğruluğunu gösterebilmek için korelasyon testleri uygulanmıştır. Bu doğrultuda öngörü hatasının oto-kovaryansı, giriş işaretinin oto-kovaryansı ve öngörü hatası ile giriş işaretinin çapraz kovaryansı hesaplanmıştır.

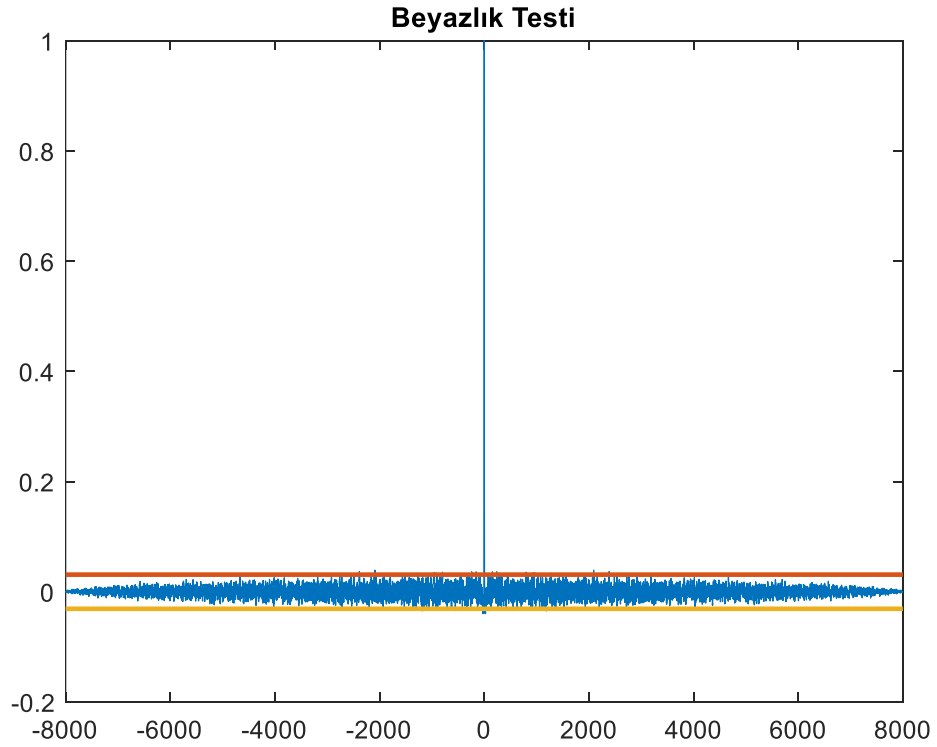




Beyazlık Testi (W)

Tahmin edilen çıkış ile gerçek sistem çıkışı arasındaki fark hesaplanmış ve beyazlık testine tabi tutulmuştur.

$$x(\tau) = \frac{\hat{r}_\varepsilon(\tau)}{\hat{r}_\varepsilon(0)} < \frac{1.96}{\sqrt{N}} \quad (22)$$



Figürden görülebileceği üzere öngörü hatasına sadece beyaz gürültünün etki ettiği ortadadır.

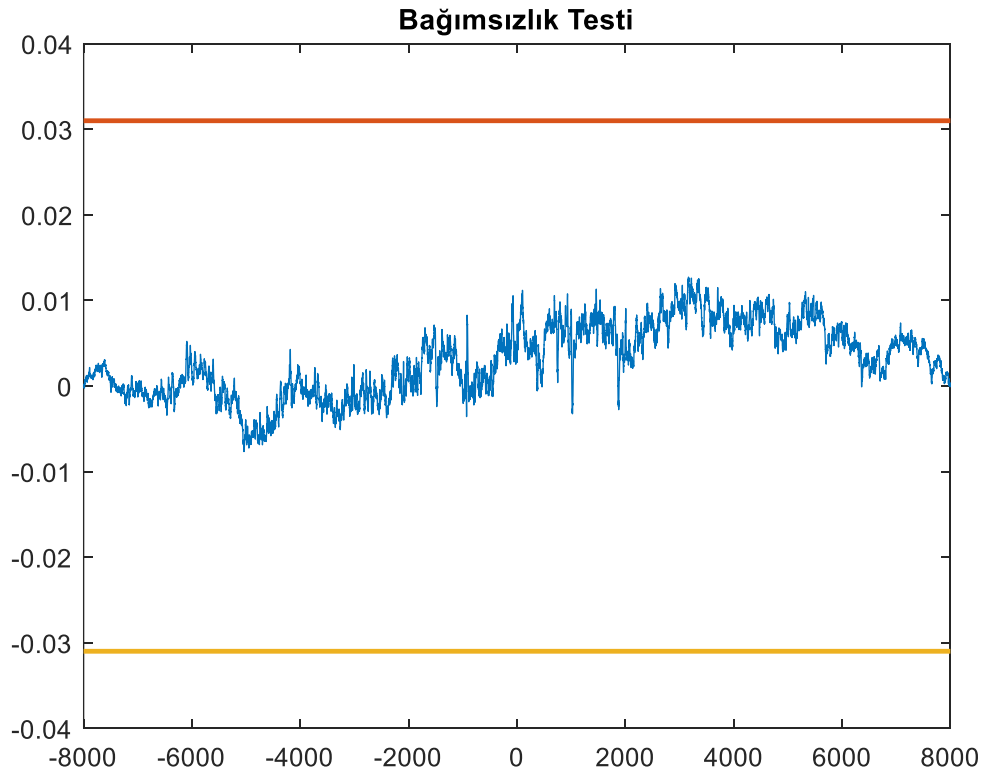
Bağımsızlık Testi (I1 ve I2)

$$x(\tau) = \frac{\hat{r}_{\varepsilon u}(\tau)}{\hat{r}_{\varepsilon}(0) * \hat{r}_u(0)} < \frac{1.96}{\sqrt{N}} \quad (23)$$

Sadece τ değerinin sıfırdan büyük olduğu durumlarda

$$|x(\tau)| < \frac{1.96}{\sqrt{N}} \quad (24)$$

eşitsizliği sağlanıyorsa, öngörü hatası $\varepsilon(\tau + t)$, $u(t)$ 'den bağımsızdır. (Kapalı çevrimli deney.)
Eğer aynı durum tüm τ değerleri için geçerli ise öngörü hatası $\varepsilon(\tau + t)$, $u(t)$ 'den yine bağımsızdır fakat bu sefer deney açık çevrimlidir.



Yukarıdaki grafiğe bakılarak sistem tanıma deneyleri sonucunda elde edilen sistem modelinin korelasyon testlerini başarılı bir şekilde geçtiği gözlemlenmektedir.

Nonlinear Sistem Modelinin Eldesi

Elde ettiğimiz modelin doğruluğunu gösterdikten sonra, sistemin nonlinear dinamiklerini barındıran mekanik kısmının modeline geçiş yapılabilir. Bu geçiş için iki yol kullanılabilir.

- Sürekli zamanda kullanılan kontrolör yapıları ayrıklaştırılıp, $T(z)$ ve $C(z)$ 'ler kullanılarak $G(z)$ elde edilebilir.
- Elde edilen ayrık sistem modeli $T(z)$, sürekli zamana geçirilir ve $T(s)$ ile $C(s)$ 'leri kullanarak yaklaşık $G(s)$ elde edilir.

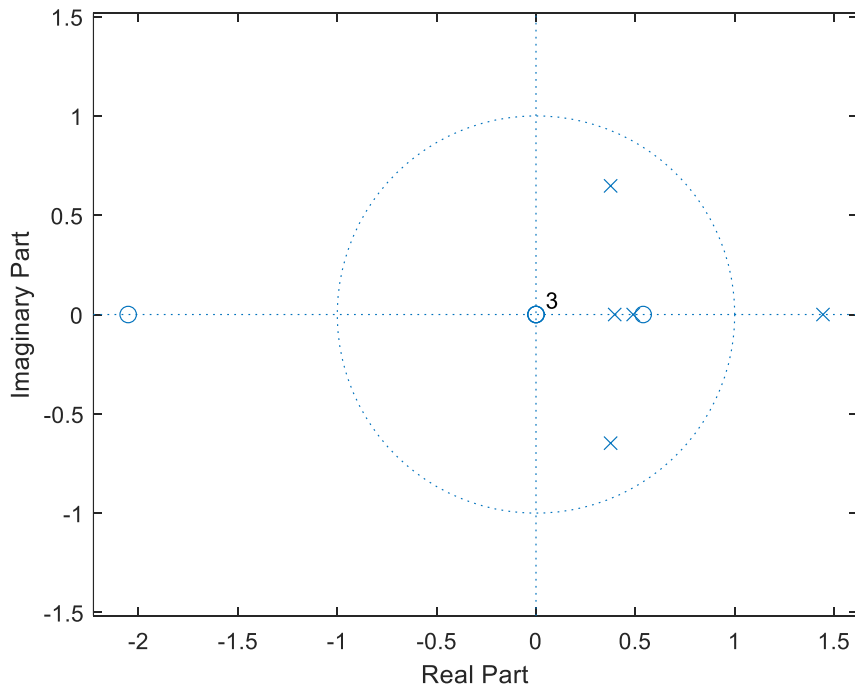
Direk olarak ayrık zaman bölgesinde kontrolör tasarımı yapılmadığı için her iki durumda da yaklaşıklıklar olacaktır. Fakat bu yaklaşıklıkların mekanik sistemin modelinin davranışını önemli ölçüde değiştirecek biçimde olması beklenmemektedir.

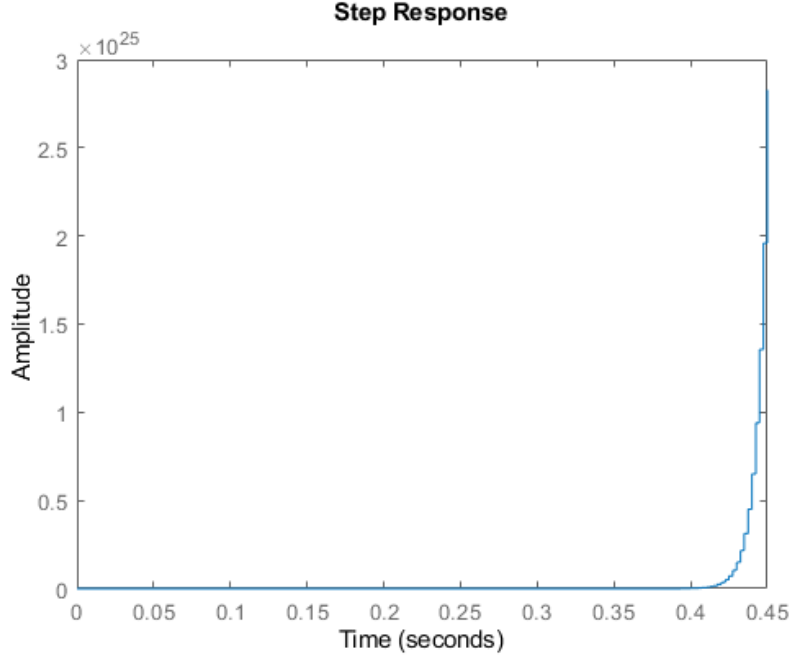
$$G_m(s) = \frac{T_{out} + T_{out} * PI_{in} * G_e}{PI_{out} * PI_{in} * G_e - PI_{in} * G_e * T_{out} * D + PI_{in} * T_{out} * G_e * PI_{out}}$$

İlk olarak önerilen ilk yol kullanılmıştır. Kullanılan kontrolörler ayrıklaştırılmış ve mekanik sistemin ayrık zaman bölgesindeki modeli elde edilmiştir.

$$G_m(z) = \frac{3.907e - 05 z^5 + 5.91e - 05 z^4 - 4.323e - 05 z^3}{z^5 - 3.08 z^4 + 3.781 z^3 - 2.69 z^2 + 1.035 z - 0.1567}$$

Modelin sıfır ve kutupları ile modelin birim basamak yanıtı bulunmuştur.

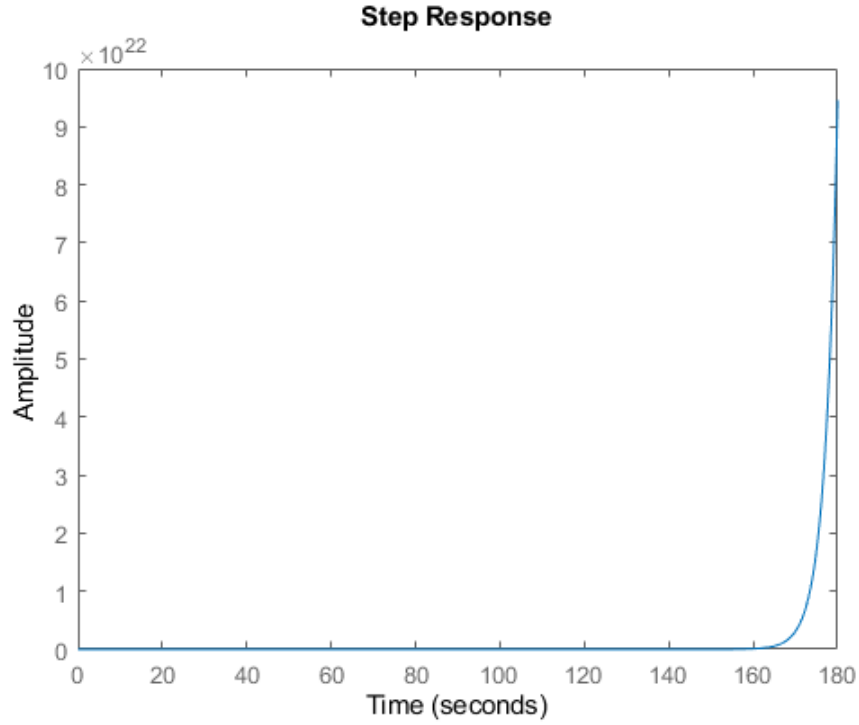




Nonlinear sistem modelinin eldesi için önerilen ikinci yol kullanılır ise sürekli zamanda bir model elde edilir.

$$G_m(s) = \frac{1.658e-05 s^6 + 0.04933 s^5 + 56.26 s^4 + 3.175e04 s^3 + 7.653e06 s^2 + 1.387e08 s}{s^6 + 384.7 s^5 + 1.961e08 s^4 + 7.544e10 s^3 + 1.065e12 s^2 - 8.797e09 s - 1.242e11}$$

Sürekli zamanda elde edilen modele ait transfer fonksiyonun -0.3 noktasında kutbu olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple kararsız davranması beklenmektedir.



Sonuçlar

Son olarak deney boyunca yapılanlar ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Maglev sistemler doğaları gereği kararsız dinamiğe sahiplerdir. Tanıma işleminin gerçekleşmesi için kararlı kılınmalılardır.
- Önerilen kontrol yapısı sistemi kararlı kılmayı başarmıştır.
- Maglev sistemleri çok hızlı dinamiklere sahip oldukları için bu dinamikleri yakalayabilecek, düşük frekanslarda zengin içeriğe sahip giriş işareti uygulanmalıdır.
- Tanıma işlemi sonucu elde edilen model, korelasyon testlerini başarılı bir şekilde geçmiştir.
- Kontrolör oluşturulurken doğrudan ayrık tasarım yapılmadığı için, sistemin doğrusal olmayan kısmını temsil eden modelde yaklaşıklıklar olacaktır.