1. AMAÇ

Proje 1' de amaç, sırasıyla, bir endüstriyel ısıl sürecin, bir hareket düzeneğinin ve bir kaldırma düzeneğinin gerçek zamanlı benzetim programını yazmaktır.

Projeyi anlatan bu belge boyunca verilen sistem eğrileri, gerçek sistem eğrileri olarak; benzetim programının yanıtları ise benzetim yanıtı olarak anılmıştır.

2. PROJENİN YAPILIŞI

Sistemlerin açık çevrim basamak girişlerine yanıtları üzerinden transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Ardından sistemlerin Bode diyagramından yararlanılarak, örnekleme zamanları bulunmuş ve fark denklemleri elde edilmiştir.

Ardından PLC'de SCL dili kullanılarak fonksiyon blokları oluşturulmuş ve bu fonksiyon blokları sistemin örnekleme zamanına göre çalışan OB35 bloğu altında çağrılmıştır.

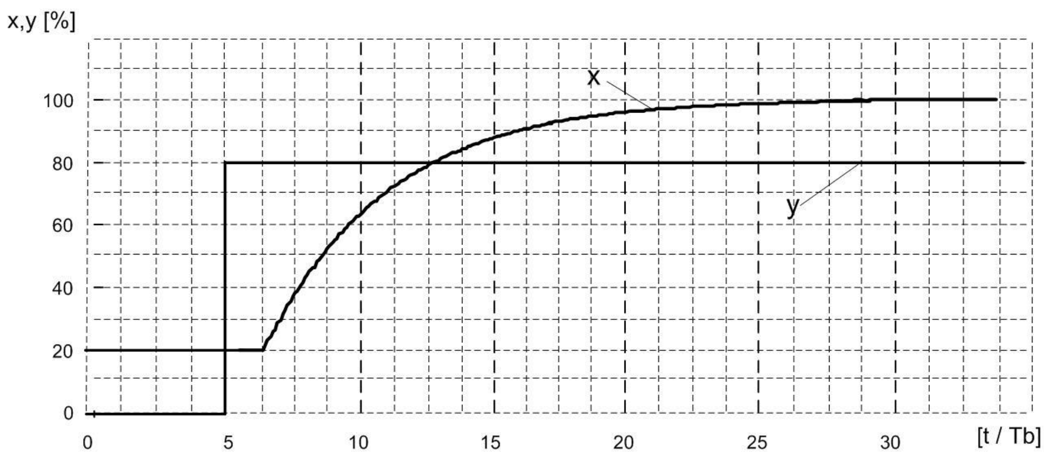
Sistem yanıtları FB41 PID bloğu yardımı ile PID Control Parameter Assignment ile izlenmiştir.

Sistemin ayrıntılı yanıtı ise veri toplayan bir fonsiyon ile data bloklarına yazılmış ardından EXCEL programına bakılarak, benzetimin başarısı görülmüştür.

3. SİSTEM MODELİNİN ÇIKARILMASI

a. Endüstriyel Isıl Sürece İlişkin Model

Gerçek sistemin basamak girişe ilişkin yanıtı Şekil 1'de verilmiştir:



Şekil 1: Verilen Sistemin Açık Çevrim Basamak Giriş Yanıtı

Takım 5 için Tb parametresi 2.0 olarak verilmiştir. Böyle bir sistemin transfer fonksiyonuna ilişkin ifade şöyledir:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-sL}$$

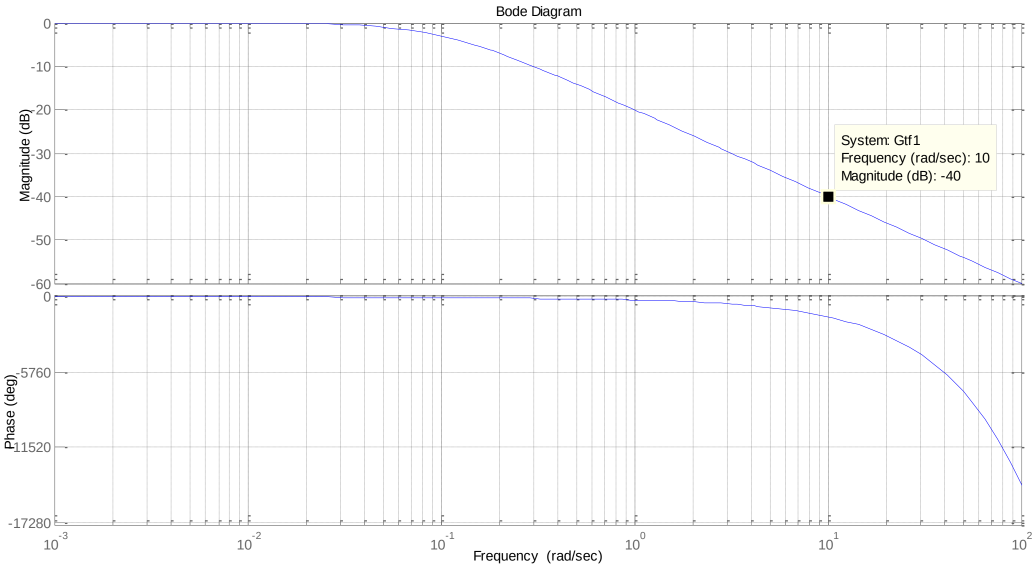
Şekil 1'den yararlanılarak şu hesaplar yapılabilir:

$$L = (6.25 - 5)2.0 = 2.5s$$
$$\tau = (11.25 - 6.25)2.0 = 10s$$
$$K = \frac{Xs - Xi}{Ys - Yi} = \frac{100 - 20}{80 - 0} = 1$$

Buna göre sistemin transfer fonksiyonu:

$$G(s) = \frac{1}{10s + 1} e^{-s2.5}$$

Bu sisteme ilişkin Bode diyagramı MATLAB aracılığı ile şöyle bulunur:



Şekil 2: Bulunan G(s)'e İlişkin Bode Diyagramı

Sistemin kritik frekansı 10 rad/s'dir. Örnekleme frekansı bu frekansın en az iki katı olmalıdır:

$$\frac{2\pi}{T} \geq 2wc = 20\,\text{rad/s}$$

Örnekleme zamanı T=0.1 s yani 100 ms için bu şart sağlanmaktadır:

$$\frac{2\pi}{0.1} = 62.8319 \geq 2wc = 20$$

Şu halde örnekleme zamanı 0.1 s olarak seçilebilir.

Bu şartlar altında 100ms'de bir çalışan OB35 bloğu altına yazılmış benzetim programını içeren fonksiyon bloğu çalıştırılıp veri toplandığında şekil 3 elde edilmiştir:

Buna göre sistemin ölü zamanı:

$L = 4.8 - 2.2 = 2.6s$

Sistemin yerleşme zamanı %2'lik banda girdiği ilk andaki zaman üzerinden:

$ts = 41.7 - 2.2 = 39.5$ s'dir.

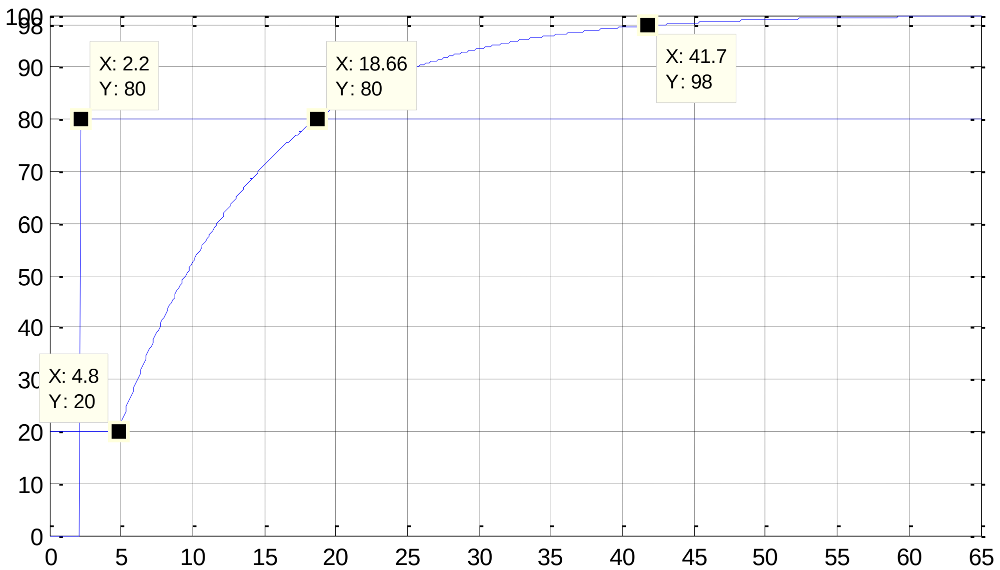
Bu sonuçlar şekil 1 ile karşılaştırıldığında ölü zamanlar arasında 0.1s diğer bir deyişle %4'lük bir hata yapılmıştır. Yani gerçek sistem ile benzetim arasında ölü zaman açısından sadece %4'lük bir hata yapılmıştır.

Verilen sistemde sistemin %98'lik banda 26.25. t/Tb'de girdiği kabul edilirse $ts = (26.25 - 6.25)2.0 = 40.0s$ 'dir.

Buna göre benzetim ile gerçek sistem arasında yerleşme zamanı açısından $e_{ts} = \frac{40 - 39.5}{40} 100 = \%1.25$ 'lik bir hata yapılmıştır.

Gerek yerleşme zamanı gerek ölü zaman gerekse de sistem zaman sabiti açısından benzetim ile gerçek sistem eğrileri karşılaştırıldığında, arada çok küçük hatalar olduğu, benzetimin gerçek sistemi çok büyük bir yakınlıkla takip ettiği söylenebilir.

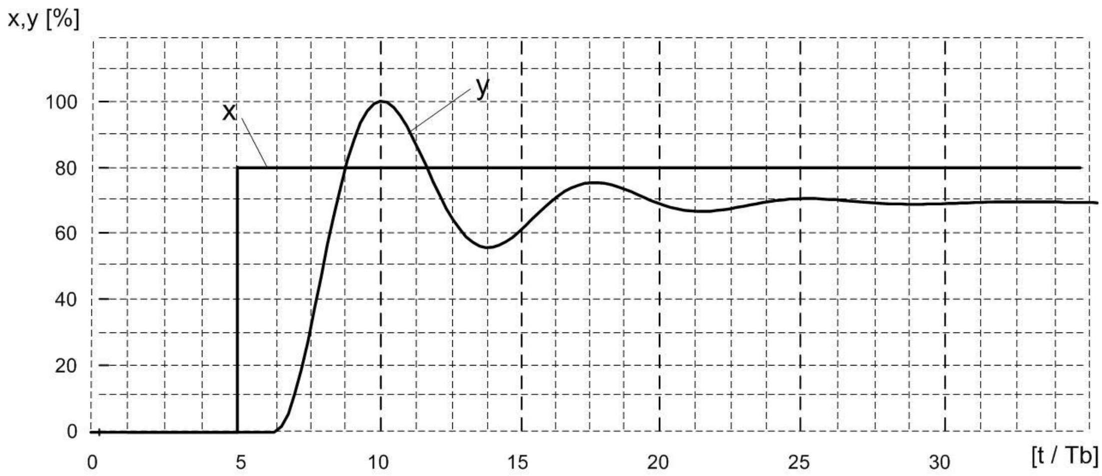
Bu sonuçlara göre benzetim programı başarılı addedilebilir.



Şekil 3: OB35 Bloğu Altına Yazılmış Benzetim Programını İçeren Fonksiyon Bloğu Çalıştırılıp Veri Toplandığında Elde Edilen Basamak Girişe Karşın Sistem Yanıtı

b. Hareket Düzeneğine İlişkin Model

Gerçek sistemin basamak girişe ilişkin yanıtı Şekil 4’te verilmiştir:



Şekil 4: Verilen Sistemin Açık Çevrim Basamak Giriş Yanıtı

Takım 5 için Tb parametresi 2.0 olarak verilmiştir.

Böyle bir sistemin transfer fonksiyonuna ilişkin ifade şöyledir:

$$G(s) = \frac{K{w_n}^2}{s^2 + 2\xi w_n s + {w_n}^2} e^{-sL}$$

Şekil 4’ten yararlanılarak şu hesaplar yapılabilir:

$$c = \frac{ym - Kxm}{Kxm} = \frac{100 - 70}{70} = 0.429$$

$$\delta = \ln(c) = -0.8473$$

$$\xi = \sqrt{\frac{\delta^2}{\pi^2 + \delta^2}} = 0.2604$$

$$tp = (10 - 6.25)2.0 = 7.5s$$

$$L = (6.25 - 5)2.0 = 2.5s$$

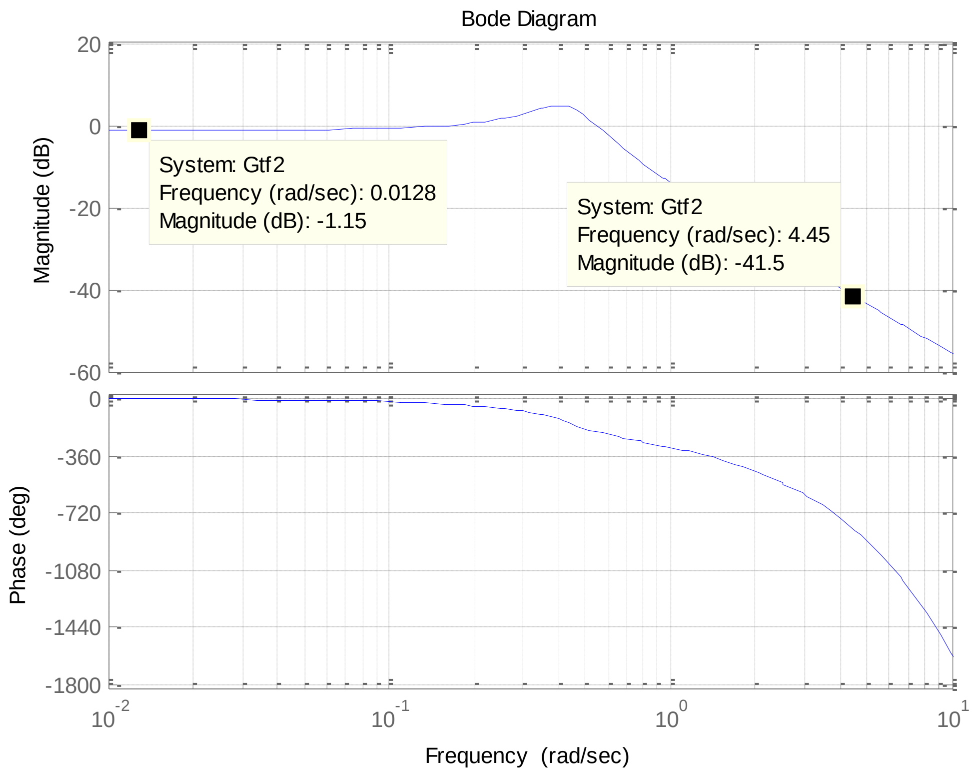
$$K = \frac{Kxm}{xm} = \frac{70}{80} = 0.8750$$

$$w_n = \frac{\pi}{tp\sqrt{1 - \zeta^2}} = 0.4338$$

Buna göre sistemin transfer fonksiyonu:

$$G(s) = \frac{0.1647}{s^2 + 0.2259s + 0.1882} e^{-s2.5}$$

Bu sisteme ilişkin Bode diyagramı MATLAB aracılığı ile şöyle bulunur:



Şekil 5: Bulunan G(s)'e İlişkin Bode diyagramı

Sistemin kritik frekansı 4.45 rad/s'dir. Örnekleme frekansı bu frekansın en az iki katı olmalıdır:

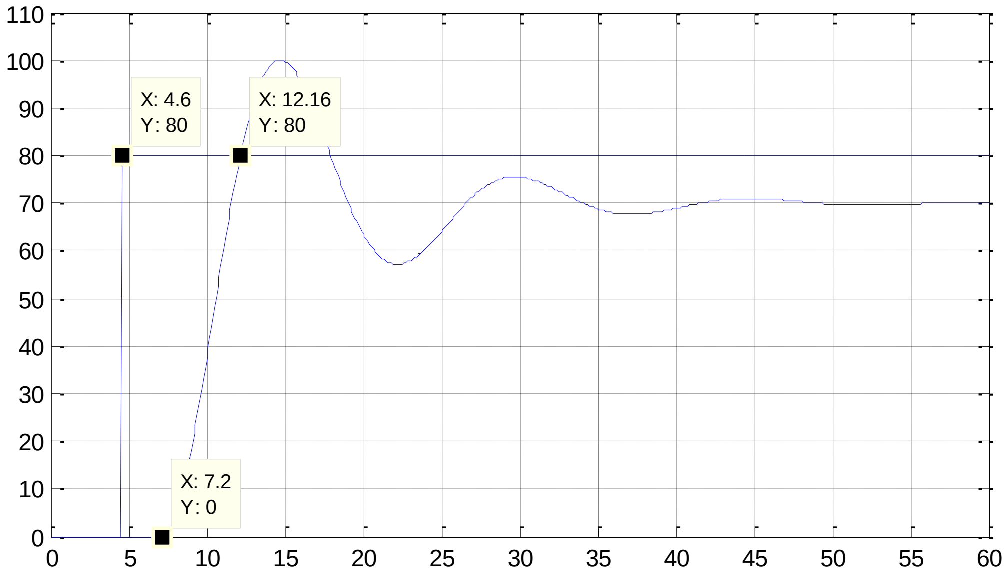
$$\frac{2\pi}{T} \geq 2wc = 8.9\,\text{rad/s}$$

Örnekleme zamanı T=0.1 s yani 100 ms için bu şart sağlanmaktadır:

$$\frac{2\pi}{0.1} = 62.8319 \geq 2wc = 8.9$$

Şu halde örnekleme zamanı 0.1 s olarak seçilebilir.

Bu şartlar altında 100ms'de bir çalışan OB35 bloğu altına yazılmış benzetim programını içeren fonksiyon bloğu çalıştırılıp veri toplandığında şekil 6 elde edilmiştir:



Şekil 6: OB35 Bloğu Altına Yazılmış Benzetim Programını İçeren Fonksiyon Bloğu Çalıştırılıp Veri Toplandığında Elde Edilen Basamak Girişe Karşın Sistem Yanıtı

Bu şekle göre ölü zaman:

$L = 7.2 - 4.6 = 2.6s$

Basamak giriş ile çıkış eğrisinin kesiştiği nokta ile basamak girişin maksimum genliğe ulaştığı nokta arasındaki zaman:

$t = 12.16 - 4.6 = 7.56s$

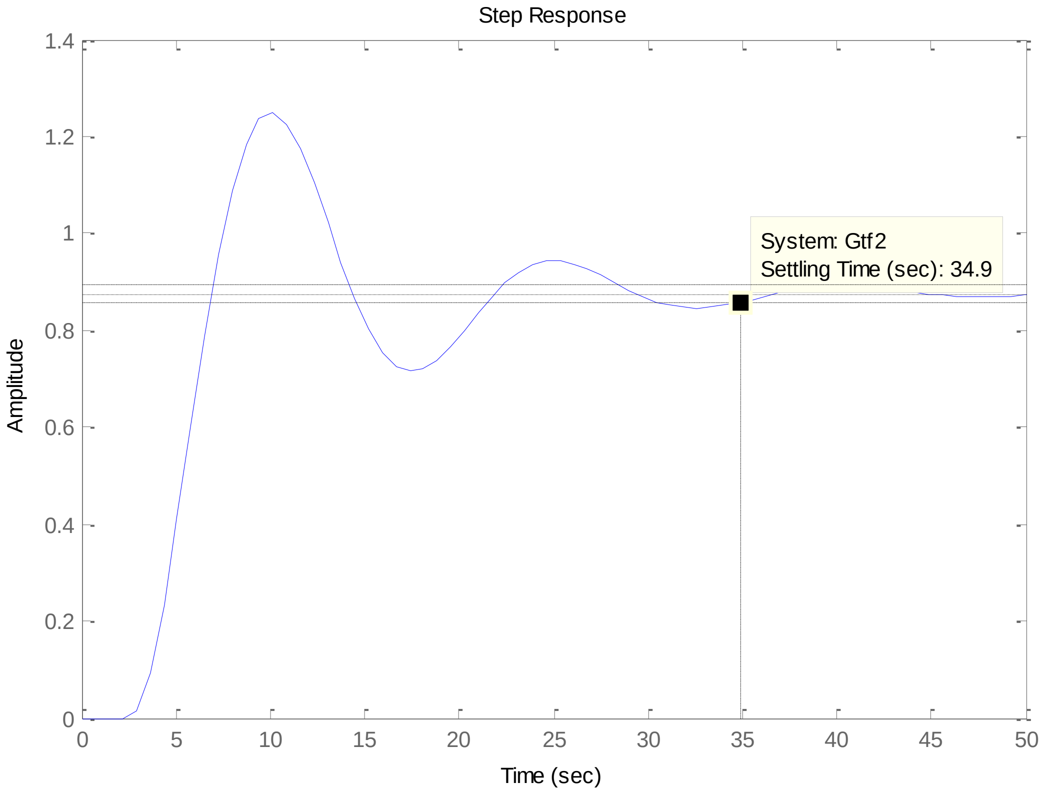
Gerçek sistem eğrisinde ölü zaman 2.5s idi. Buna göre benzetim ile gerçek sistem arasında ölü zaman açısından %4'lük bir hata yapılmıştır.

Şekil 4'e göre X ile Y eğrisinin kesiştiği nokta ile, X'in %80'e ulaştığı zaman:

$t = (8.75 - 5)2.0 = 7.5s$

Buna göre gerçek sistem ile benzetim arasında bu zaman açısından %0.8'lik bir hata olmuştur.

Şekil 4 üzerinden sistemin yerleşme zamanı grafiksel olarak 23.75 t/Tb değerine denk gelmektedir. Bu kanıyı, gerçek sisteme ilişkin bulunan transfer fonksiyonunun birim basamak yanıtı da desteklemektedir. Buna göre yerleşme zamanı 34.9s'dir. Şekil 7 bu durumu göstermektedir.



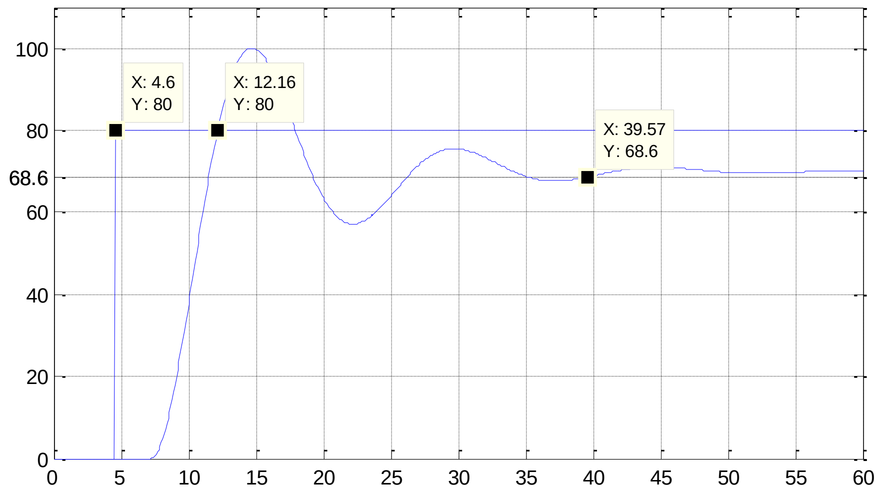
Şekil 7: Benzetimin Birim Basamak Girişe Yanıtı

Böyle bir değerlendirme yapıldığında gerçek sistemin yerleşme zamanı:

$$ts = (23.75 - 6.25)2.0 = 35s$$

Benzetim üzerinden, Şekil 8'de görüleceği üzere,bu değer sistemin %2'lik banda (%68.6'nın üzerine çıktığı an) girdiği ilk an olarak kaydedilirse:

$ts = 39.57 - 4.6 = 34.97\,\text{s}$



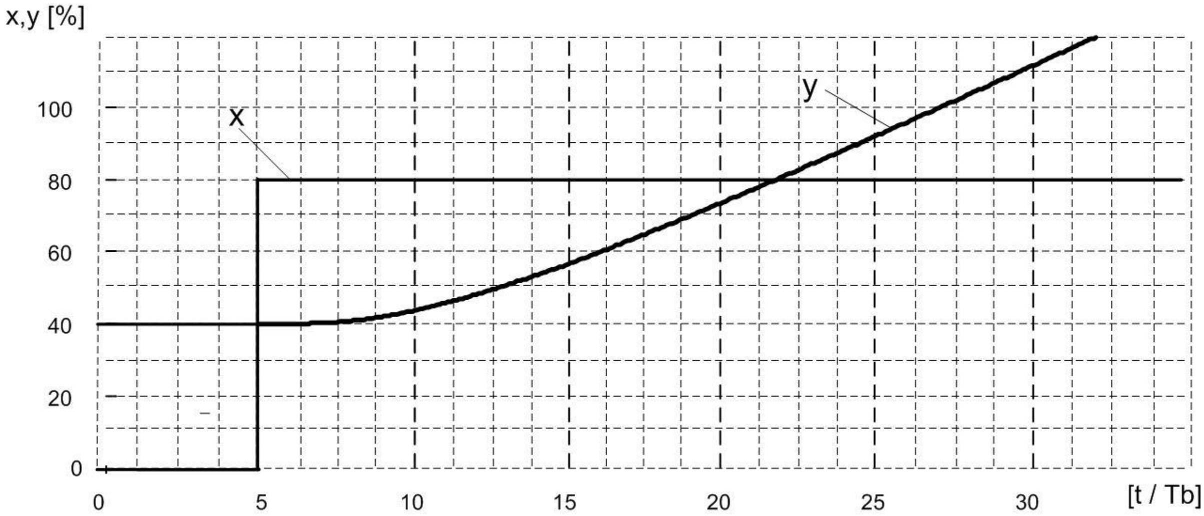
Şekil 8: OB35 Bloğu Altına Yazılmış Benzetim Programını İçeren Fonksiyon Bloğu Çalıştırılıp Veri Toplandığında Elde Edilen Basamak Girişe Karşın Sistem Yanıtı

Buna göre yerleşme zamanı açısından gerçek sistem ile benzetim arasında %0.085'lik bir hata vardır.

Gerek gerçek eğri-benzetim eğrisi üzerinden yapılan karşılaştırmalar, gerek gerçek transfer fonksiyonunun birim basamak yanıtı ile benzetim arasındaki karşılaştırmalar, benzetim programının gerçek sistemi çok büyük bir doğrulukla taklit ettiğini dolayısıyla başarılı olduğunu göstermektedir.

c. Kaldırma Düzeneğine İlişkin Model

Gerçek sistemin basamak girişe ilişkin yanıtı Şekil 9'da verilmiştir:



Şekil 9: Verilen Sistemin Açık Çevrim Basamak Giriş Yanıtı

Takım 5 için Tb parametresi 2.0 olarak verilmiştir. Böyle bir sistemin transfer fonksiyonuna ilişkin ifade şöyledir:

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} e^{-sL}$$

Şekil 9'dan yararlanılarak şu hesaplar yapılabilir:

$$Kxm(L + \tau) = 25$$
$$L = (7.5 - 5)2.0 = 5.0$$
$$\tau = (11.25 - 7.5)2.0 = 7.5$$
$$Kxm = \frac{25}{7.5 + 5.0} = 2$$
$$xm = 80$$
$$K = \frac{2}{80} = 0.025$$

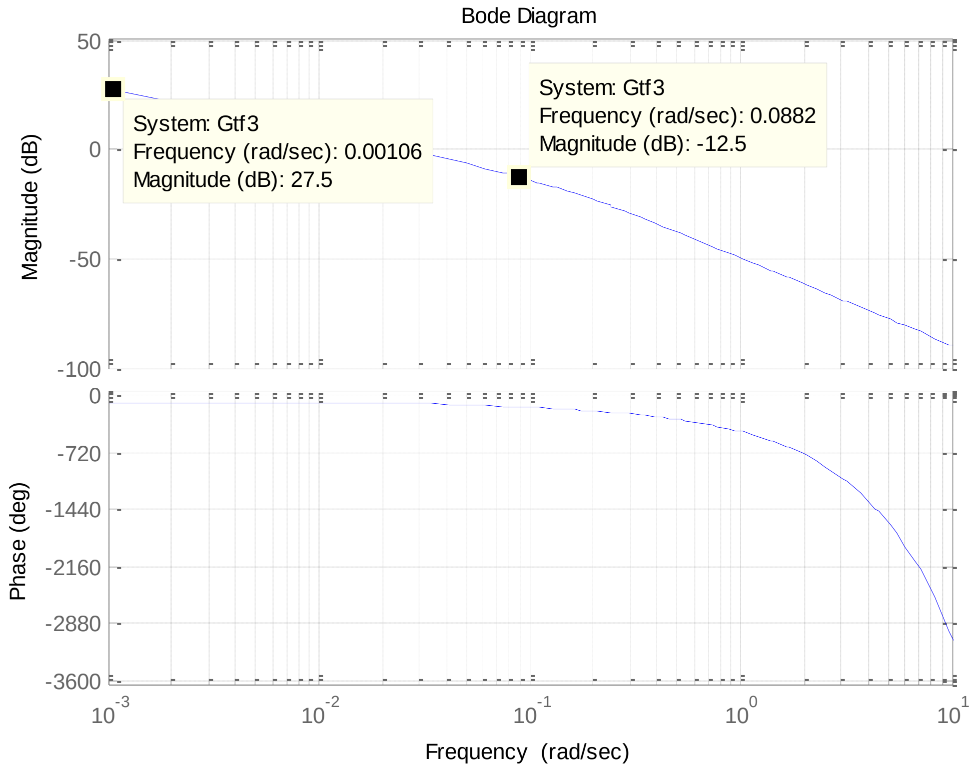
Sisteme verilen basamak girişin başladığı an ile giriş ve çıkış eğrilerinin kesiştiği an arası şöyle hesaplanabilir:

$t = (21.25 - 5)2.0 = 32.5s$

Bulunan değerlere göre sistemin transfer fonksiyonu:

$$G(s) = \frac{0.025}{s(7.5s + 1)} e^{-s5.0}$$

Bu sisteme ilişkin Bode diyagramı MATLAB aracılığı ile şöyle bulunur:



Şekil 10: Bulunan G(s)'e İlişkin Bode diyagramı

Sistemin kritik frekansı 0.57 rad/s'dir. Örnekleme frekansı bu frekansın en az iki katı olmalıdır:

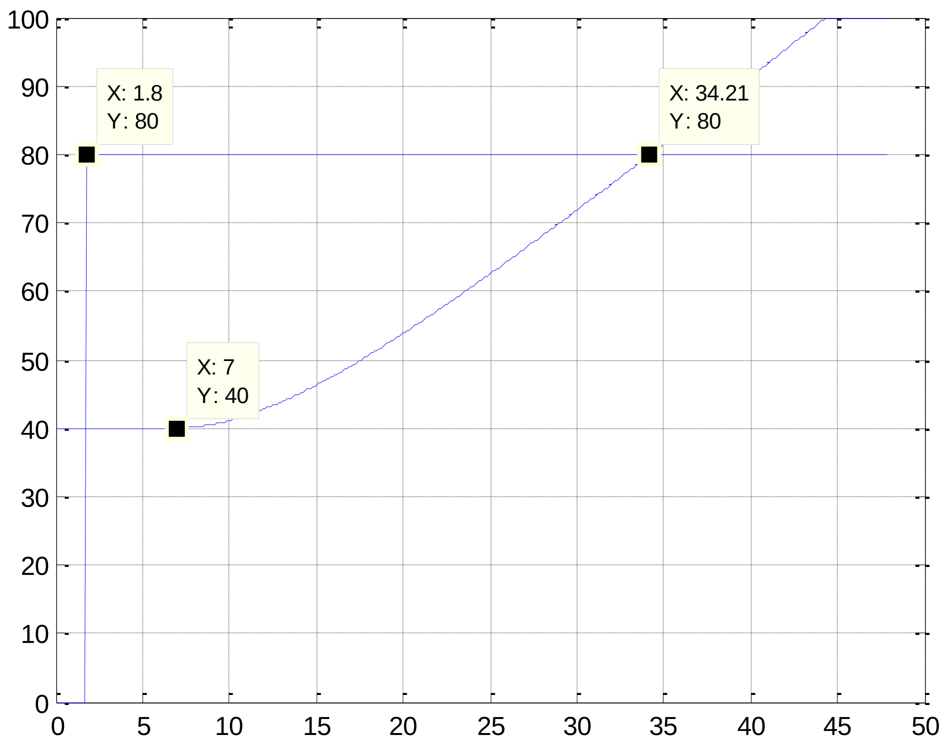
$$\frac{2\pi}{T} \geq 2wc = 0{,}1764\,\mathrm{rad/s}$$

Örnekleme zamanı T=0.1 s yani 100 ms için bu şart sağlanmaktadır:

$$\frac{2\pi}{0.1} = 62.8319 \geq 2wc = 0{,}1764$$

Şu halde örnekleme zamanı 0.1 s olarak seçilebilir.

Bu şartlar altında 100ms'de bir çalışan OB35 bloğu altına yazılmış benzetim programını içeren fonksiyon bloğu çalıştırılıp veri toplandığında şekil 11 elde edilmiştir:



Şekil 11: OB35 Bloğu Altına Yazılmış Benzetim Programını İçeren Fonksiyon Bloğu Çalıştırılıp Veri Toplandığında Elde Edilen Basamak Girişe Karşın Sistem Yanıtı

Şekil 11'e göre benzetim programında ölü zaman:

$L = 7 - 1.8 = 5.2$

Sisteme verilen basamak giriş eğrisi ile sistem yanıtı eğrisinin çakıştığı ilk an 34.21s'dir. Sisteme basamak girişi ise t=1.8s'de uygulanmıştır. Buna göre bu iki zaman arası

$t = 34.21 - 1.8 = 32.41s$

Gerçek zamanda ölü zaman 5s idi. Buna göre benzetim ile gerçek eğri arasında ölü zaman açısından %4'lük bir hata yapılmıştır.

Basamak giriş verildikten sonra, sistem çıkışı ile basamak girişin çakıştığı an, gerçek sistemde 32.5s, benzetimde ise 32.41s'dir. Bu değer açısından gerçek sistem ile benzetim arasında % 0,28'lik bir hata yapılmıştır.

Her iki bakış açısından da, benzetim programının, gerçek sistem eğrilerine çok benzer eğriler ürettiği söylenebilir. Bu durum, benzetim programının gerçek sistemi çok büyük bir doğrulukla taklit ettiğini dolayısıyla başarılı olduğunu göstermektedir.

4. MODELLENEN SİSTEMLERİN KONTROLÜ

a. Endüstriyel Isıl Sürece İlişkin Modelin Kontrolü

Birinci mertebeden sistemin transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir:

$$G(s) = \frac{1}{10s+1} e^{-s2.5}$$

Transfer fonksiyonunun z düzlemindeki karşılığı şöyle bulunur:

Sıfırıncı mertebeden tutucu kullanılsın ve T örnekleme zamanı seçilsin

$$G_{zoh}(s) = \frac{1-e^{-sT}}{s}$$
$$G(z) = Z\{G_{zoh}(s)G(s)\}$$

Buna göre sistemin z dönüşümünü alınsın:

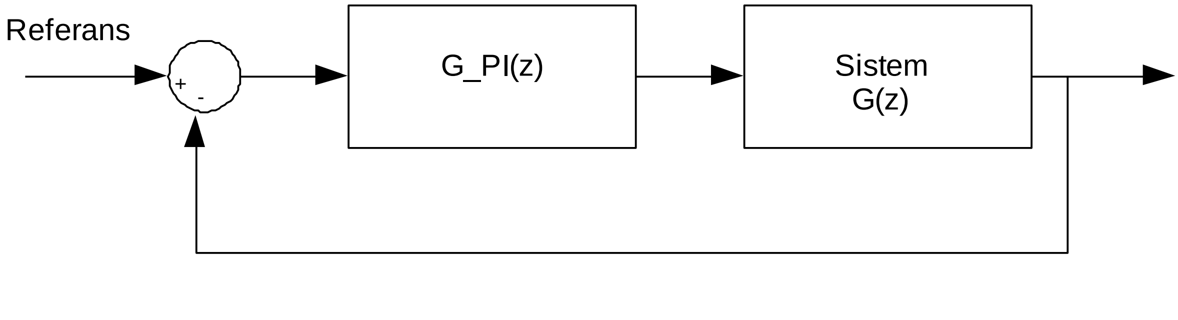
$$G(z) = Z\{\frac{1-e^{-sT}}{s}\frac{K}{\tau s+1}e^{-sL}\} = Z\{\frac{1-e^{-sT}}{s}\frac{K/\tau}{s+1/\tau}e^{-sL}\}$$
$$G(z) = K(1-e^{-sT})e^{-sL}Z\{\frac{1}{s} - \frac{1}{s+1/\tau}\}$$
$$z = e^{sT}, d = L/T, A = e^{-T/\tau}$$

$$G(z) = K(1-e^{-sT})e^{-sL}Z\{\frac{1}{s} - \frac{1}{s+1/\tau}\}$$
$$G(z) = K(1-z^{-1})z^{-d}\{\frac{z}{z-1} - \frac{z}{z-e^{-T/\tau}}\}$$
$$G(z) = K(\frac{z-1}{z})z^{-d}\{\frac{z}{z-1} - \frac{z}{z-e^{-T/\tau}}\}$$
$$G(z) = K\{1-\frac{z-1}{z-A}\}z^{-d} = K\frac{1-A}{z-A}z^{-d}$$

Bu değerler kullanılarak transfer fonksiyonu şöyle bulunur:

$$G(z) = \frac{0.00995}{z-0.99} z^{-25}$$

Sistem şu blok diyagramına göre kapalı çevrime alınır:



Bu sistem için bir PI kontrolör tasarlanmıştır. PI kontrolörün z düzlemindeki karşılığı şöyledir:

$$G_{PI}(z) = K_c(1+\frac{T}{T_I}\frac{1}{z-1}) = Kc(\frac{z-\frac{T_I-T}{T_I}}{z-1})$$

$$\alpha = \frac{T_I-T}{T_I}, T_I = \frac{T}{1-\alpha}$$

$$G_{PI}(z) = Kc\frac{z-\alpha}{z-1}$$

$$G(z)G_{PI}(z) = Kc\frac{z-\alpha}{z-1}K\frac{1-A}{z-A}z^{-d}$$

$\alpha = A$ seçildiği takdirde sıfır kutup götürülmesi yapılmış olur:

$$G(z)G_{PI}(z) = Kc\frac{z-A}{z-1}K\frac{1-A}{z-A}z^{-d} = \frac{KcK(1-A)}{z^d(z-1)} = \frac{K^*}{z^d(z-1)}$$

Kapalı çevrim sistem kutupları reel eksende ve aynı ise kritik sönümlü olur. Buna göre kapalı çevrim transfer foksiyonu yazılıp karakteristik denklem elde edildiğinde aşağıdaki ifadelere ulaşılır:

In[12]:= $Ls = \frac{Ky}{z^d\ (z-1)}$

In[13]:= $Ts = Together[ExpandAll[\frac{Ls}{1+Ls}]]$

Out[13]= $\frac{Ky}{Ky - z^d + z^{1+d}}$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonunda, karakteristik denklemin z'ye göre türevinin eşit olduğu noktadaki kazanç değeri, sistemi kritik sönümlü kılar:

In[18]:= $Ky = \frac{1-z}{z\,\hat{}\,-d}$

In[22]:= $tur = \partial_z Ky$

In[24]:= Solve[tur == 0, {z}]

Out[24]= $\{\{z \to \frac{d}{1+d}\}\}$

Kök değeri yerine konduğunda aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$K^* = \frac{1-z}{z^{-d}} = \frac{1-\frac{d}{d+1}}{(\frac{d}{d+1})^{-d}} = \frac{d^d}{(d+1)^{(d+1)}}$$

$$K* = KcK(1-A) = \frac{d^d}{(d+1)^{(d+1)}}$$

$$Kc = \frac{d^d}{(d+1)^{(d+1)}K(1-A)}$$

İntegral terimi için integral zamanı ifadesi ise şöyle bulunur:

$$T_I = \frac{T}{1-\alpha} = \frac{T}{1-A}$$

Bu denklemlere göre kontrolör parametreleri şöyle bulunur:

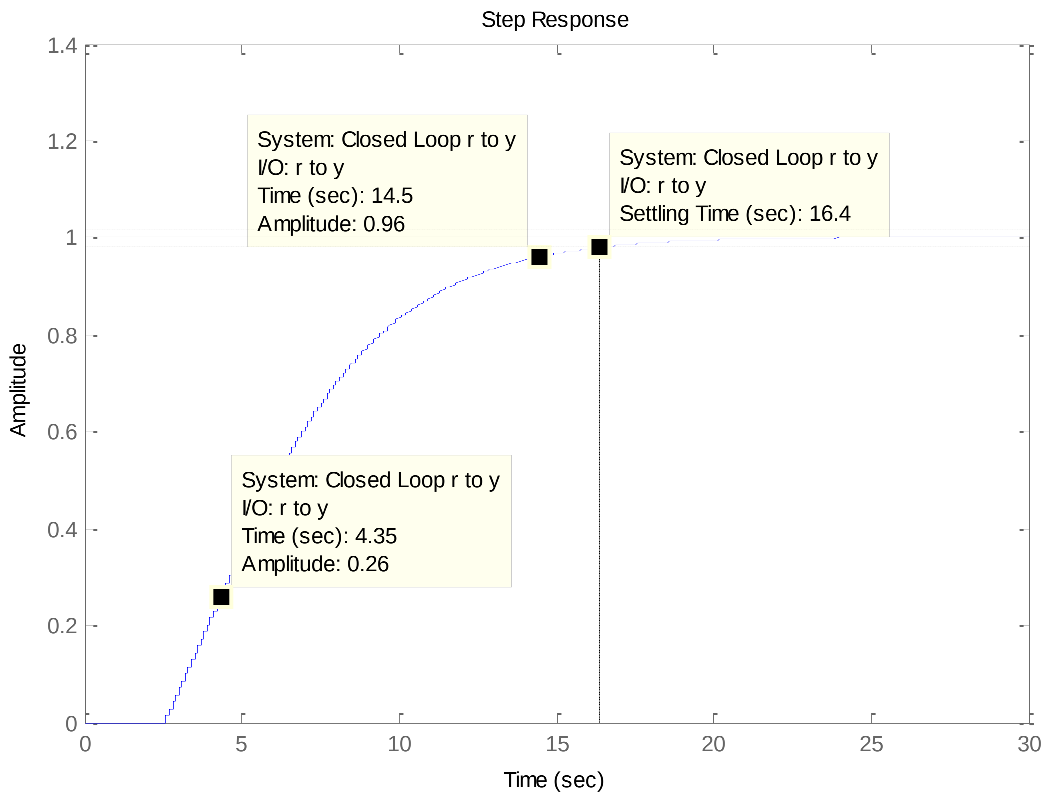
Ti = 10.0501

Kc = 1.4500

$$G_{PI}(z) = K_c(1 + \frac{T}{T_I}\frac{1}{z-1}) = 1.45(1 + \frac{0.1}{10.0501}\frac{1}{z-1})$$

$$G_{PI}(z) = 1.45(\frac{z-0.99}{z-1})$$

Matlab'da kontrolör ve sistem aşağıdaki yapıya göre kapalı çevrime alınıp simule edildiğinde kapalı çevrim sistem çıkışı elde edilir:



Şekil 12: PI ile Kontrol Edilen Sistemin Kapalı Çevrim Birim Basamak Yanıtı

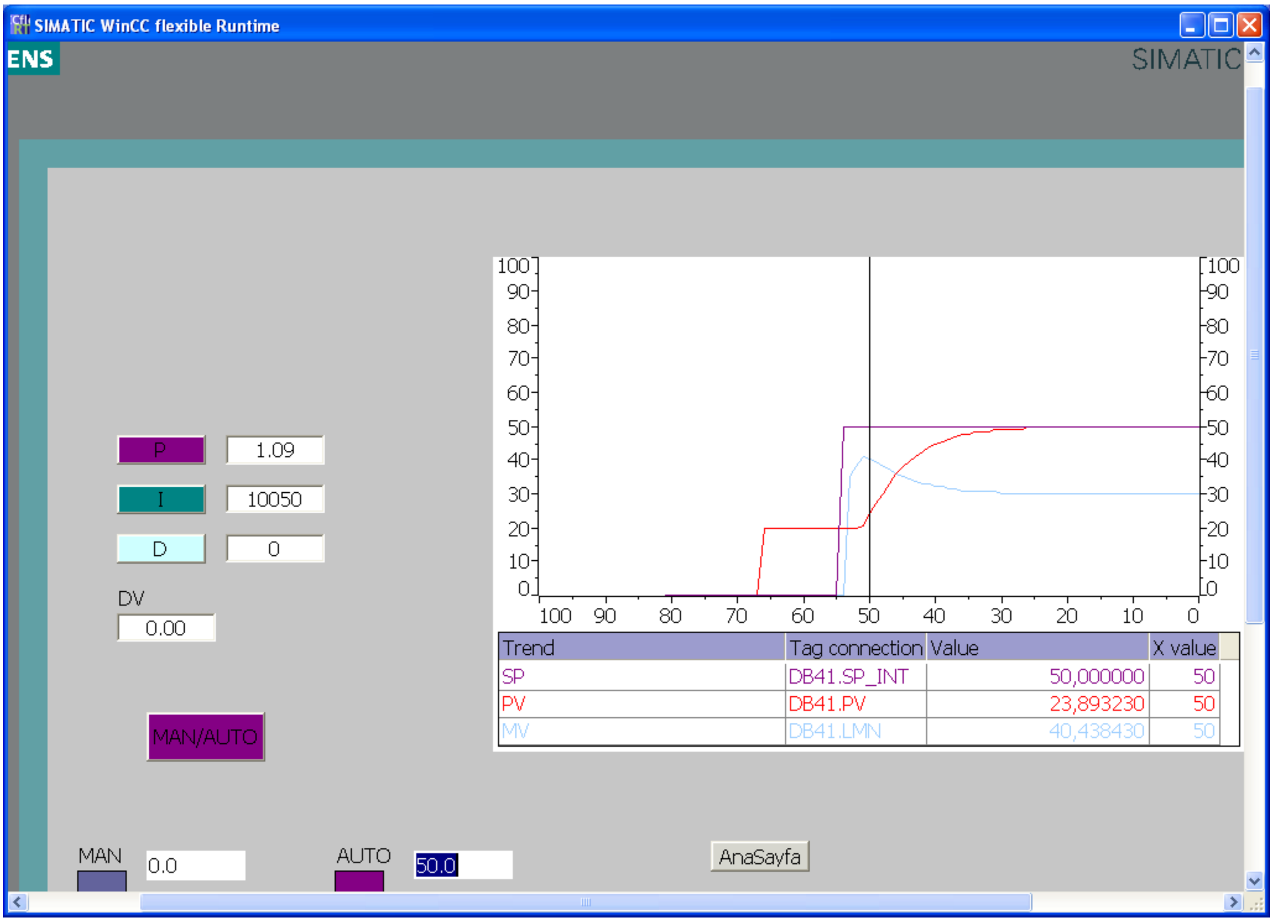
Şekil 12'ye göre sistem 16.4 saniyede yerleşmektedir.

Sistemin Çıkış değerinin %26sına ulaştığı t_1 zamanı ve %96'sına ulaştığı t_2 zamanı şöyledir:

$$t1 = 4.35 - 2.5 = 1.85s$$
$$t2 = 14.5 - 2.5 = 12s$$

Matlab'a göre sistem $\frac{t2}{t1} = 6.48 > 5$ olduğundan aşırı sönümlüdür. Aşımsız oturmuştur.

Benzetim programının çıktısı ise SCADA aracılığı ile alınmıştır ve aşağıdaki şekilde verilmiştir:



b. Hareket Düzeneğine İlişkin Model

İkinci mertebeden bir sistem olan hareket düzeneğinin transfer fonksiyonu şöyledir:

$$G(s) = \frac{0.1647}{s^2 + 0.2259s + 0.1882} e^{-s2.5}$$

Transfer fonksiyonunun z düzlemindeki karşılığı şöyle bulunur:

Sıfırıncı mertebeden tutucu kullanılsın ve T örnekleme zamanı seçilsin.

$$G_{zoh}(s) = \frac{1-e^{-sT}}{s}$$

$$G(z) = Z\{G_{zoh}(s)G(s)\}$$

$$G(z) = Z\{\frac{1-e^{-sT}}{s} \frac{Kw_n^{\ 2}}{s^2+2\xi w_n s + w_n^{\ 2}} e^{-sL}\}$$

Aşağıdaki dönüşümler kullanıldığında sistemin z düzlemindeki transfer fonksiyonu bulunabilir:

$$K_z = K(1-a\cos\theta - ab\sin\theta)$$

$$b_0 = \frac{a^2 - a\cos\theta + ab\sin\theta}{1-a\cos\theta - ab\sin\theta}$$

$$a = e^{-\xi w_n T}$$

$$b = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\theta = wT$$

$$w = w_n\sqrt{1-\xi^2}$$

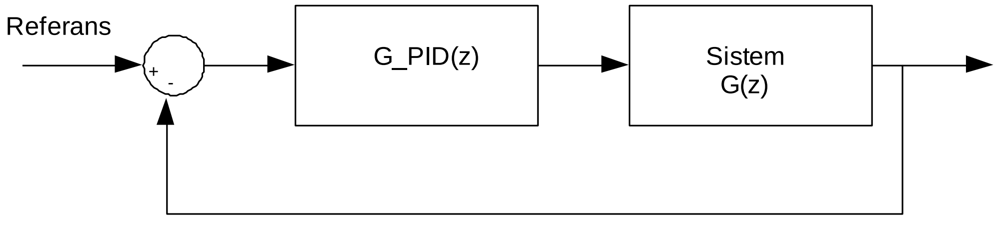
Bu dönüşümlere göre sistemin transfer fonksiyonu şöyledir:

$$G(z) = \frac{K_z(z+b_0)}{z^2-(2a\cos\theta)z+a^2} z^{-d} = \frac{K_z(z+b_0)}{z^2+a_1 z+a_0} z^{-d}$$

Bölüm 3.b'de verilen değerler kullanılarak dönüşüm değerleri, buradan hareketle de sistemin ayrık transfer fonksiyonu bulunabilir:

$$G(z) = \frac{\text{0.0008172 z + 0.000811}}{\text{z\^{}2 - 1.976 z + 0.9777}} z^{-25}$$

Bu sistem PID kontrolör ile şekil .. de gösterildiği gibi kapalı çevrime alınmıştır:



Şekil 13

Bir PID kontrolörünün z düzlemindeki transfer fonksiyonu şöyle verilebilir:

$$G_{PID}(z) = Kc(1+\frac{T}{T_I}\frac{1}{z-1}+\frac{T_D}{T}\frac{z-1}{z})$$

$$I=\frac{T}{T_I}, D=\frac{T_D}{T}$$

$$G_{PID}(z)=Kc\frac{z^2(1+D)+z(-1+I-2D)+D}{z(z-1)}$$

Bu denkleme şu dönüşümler uygulanırsa, ifade daha sade gösterilebilir:

$$K_{PID}=Kc(1+D)$$

$$\alpha=-\frac{2D+A-I}{1+D}$$

$$\beta=\frac{D}{1+D}$$

Böylece PID kontrolörünün z düzlemindeki transfer fonksiyonu şöyle gösterilebilir:

$$G_{PID}(z)=K_{PID}\frac{z^2+\alpha z+\beta}{z(z-1)}$$

Sistem ve kontrolörün birleşimi olan ileri yol transfer fonksiyonu şöyledir:

In[9]:= Ls = Gz Gpid

Out[9]= $\frac{\text{Kpid Kz } z^{-1-d}\,(b0+z)\,(z^2+z\,\alpha+\beta)}{(-1+z)\,(a0+a1\,z+z^2)}$

$\beta=a0$ ve $\alpha=a1$ seçilirse sıfır kutup götürmesi yapılabilir ve ifade sadeleşir:

In[5]:= Ls = Gz Gpid

Out[5]= $\frac{\text{Kpid Kz } z^{-1-d}\,(b0+z)\,(z^2+z\,\alpha+\beta)}{(-1+z)\,(a0+a1\,z+z^2)}$

In[7]:= Ls1 = Ls /. α → a1 /. β → a0 /. Kpid Kz → Ky

Out[7]= $\frac{\text{Ky } z^{-1-d}\,(b0+z)}{-1+z}$

Buradan hareketle kapalı çevrim transfer fonksiyonu şöyle elde edilir:

In[10]:= Ts = Together$\left[\text{Expand}\left[\frac{\text{Ls1}}{1+\text{Ls1}}\right]\right]$

Out[10]= $\frac{\text{Ky}\,(b0+z)}{b0\,\text{Ky}+\text{Ky}\,z-z^{1+d}+z^{2+d}}$

Buranda kapalı çevrim sistemin karakteristik denklemine geçilebilir ve kazanç ile ilgili ifade bulunabilir:

In[11]:= pcs = Denominator[Ts]

Out[11]= $b0\,\text{Ky}+\text{Ky}\,z-z^{1+d}+z^{2+d}$

In[12]:= Solve[pcs == 0, Ky]

Out[12]= $\left\{\left\{\text{Ky}\to-\frac{(-1+z)\,z^{1+d}}{b0+z}\right\}\right\}$

Kapalı çevrim sistemin kopma noktasındaki kazanç değerinde, kapalı çevrim kontrol sisteminin basamak girişe yanıtı kritik sönümlü olur.Kopma noktaları, karakteristik denklemden elde edilen (3.31) ifadesinin z değişkenine göre türevinin sıfır olduğu değerlerdir. Buna göre

```
In[15]:= pcsd = ∂z Ky
```

$$\text{Out[15]}= \frac{(-1+z)\, z^{1+d}}{(b0+z)^2} - \frac{(1+d)\,(-1+z)\, z^d}{b0+z} - \frac{z^{1+d}}{b0+z}$$

```
In[16]:= Solve[pcsd == 0, z]
```

$$\text{Out[16]}= \left\{\left\{z \to \frac{-2\,b0+d-b0\,d-\sqrt{4\,b0\,(1+d)^2+(2\,b0-d+b0\,d)^2}}{2\,(1+d)}\right\},\right.$$
$$\left.\left\{z \to \frac{-2\,b0+d-b0\,d+\sqrt{4\,b0\,(1+d)^2+(2\,b0-d+b0\,d)^2}}{2\,(1+d)}\right\}\right\}$$

Bulunan iki çözüm kopma noktalarını veren çözümlerdir. Buna göre kazanç şöyle bulunabilir:

```
In[13]:= Ky1 = Ky /. z → zb
```

$$\text{Out[13]}= -\frac{(-1+zb)\, zb^{1+d}}{b0+zb}$$

Bu noktadan sonra, kontrolör katsayılarını elde etmeye yönelik dönüşümler yapılabilir:

$T_D = DT, D = \frac{\beta}{1-\beta} = \frac{a0}{1-a0}$ dönüşümü ile T_D türev zamanı sabiti bulunabilir:

$$T_D = \frac{a0}{1-a0} T$$

$I = \frac{T}{T_I}, \alpha = -\frac{2D+A-I}{1+D}, \alpha = a1$ dönüşümü ile TI integral zaman sabiti bulunabilir:

$$T_I = \frac{1-a0}{1+a1+a0} T$$

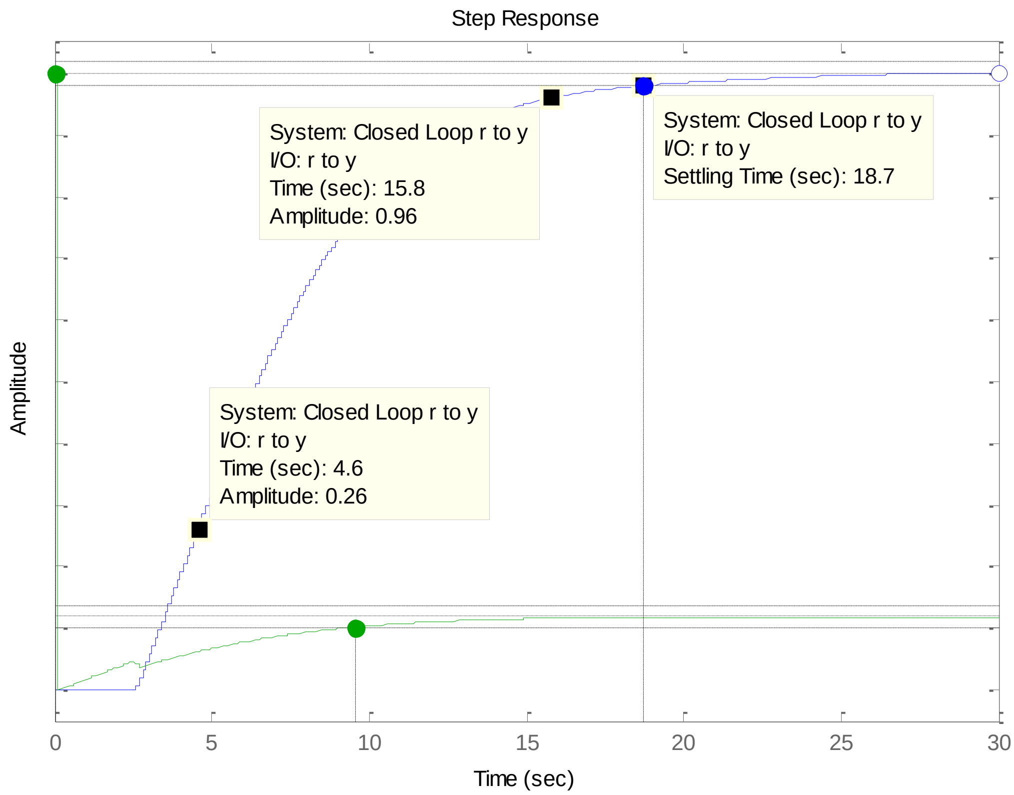
$K^* = KzK_{PID} = KzKc(1+D) = \frac{{z_b}^{d+1}(1-z_b)}{z_b+b0}$ dönüşümü ile Kc oransal kazanç değeri bulunabilir:

$$Kc = \frac{{z_b}^{d+1}(1-z_b)}{(z_b+b0)(1+D)Kz}$$

Yapılan hesaplara göre kontrolör şu transfer fonksiyonuna sahiptir:

```
In[16]:= α = -1.9758;

In[17]:= β = 0.9777;

In[25]:= Kpid = 8.1;

In[26]:= Gpid = Kpid (z^2 + α z + β) / (z (z - 1))

Out[26]= 8.1 (0.9777 - 1.9758 z + z^2) / ((-1 + z) z)
```

Bu kontrolör ile çalışan sistemin kapalı çevrim birim basamak yanıtı şekil .. de görülmektedir:



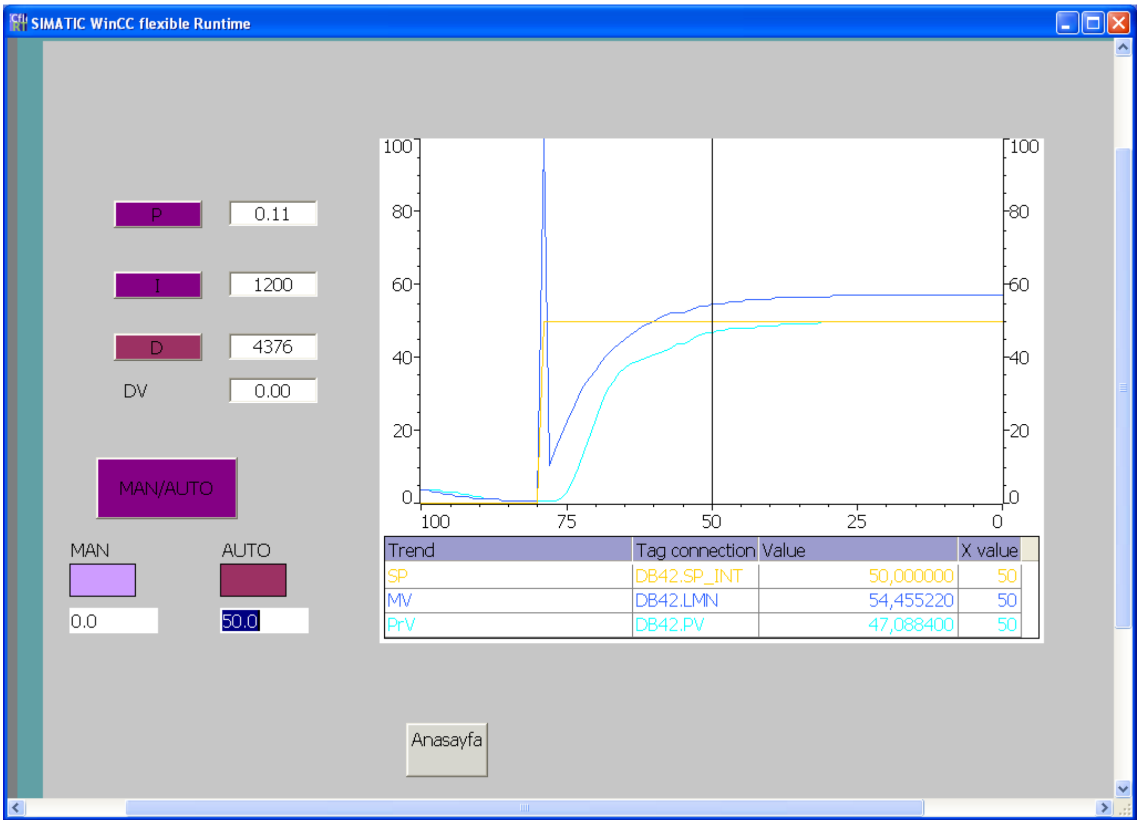
Sistemin Çıkış değerinin %26sına ulaştığı t_1 zamanı ve %96'sına ulaştığı t_2 zamanı şöyledir:

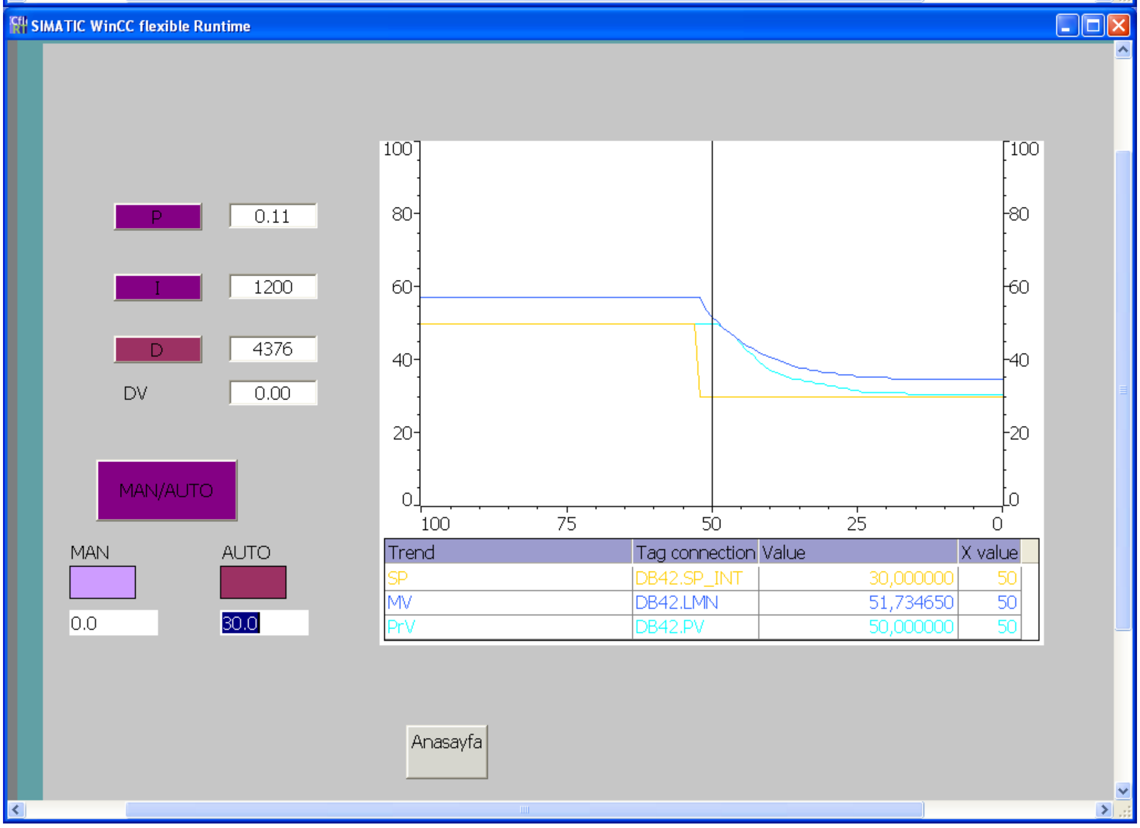
$t1 = 4.6 - 2.6 = 2s$

$t2 = 15.8 - 2.6 = 13.2s$

Matlab'a göre sistem $\frac{t2}{t1} = 6.6 > 5$ olduğundan aşırı sönümlüdür. Aşımsız oturmuştur.

Bu kontrolör ile çalışan ve aşağıda SCADA çıktısı görülen sistemin kapalı çevrim yanıtı ise şu şekilde olmuştur. Burada Matlab çözümü ile benzetim sonuçları arasında bazı farklılıklar gözlenmiş ve kazanç değerleri biraz değiştirilmiştir:





c. Kaldırma Düzeneğine İlişkin Model

Kaldırma düzeneğinin transfer fonksiyonu şöyledir:

$$G(s) = \frac{0.025}{s(7.5s+1)} e^{-s5.0}$$

Transfer fonksiyonunun z düzlemindeki karşılığı şöyle bulunur:

Sıfırıncı mertebeden tutucu kullanılsın ve T örnekleme zamanı seçilsin.

$$G_{zoh}(s) = \frac{1-e^{-sT}}{s}$$

$$G(z) = Z\{G_{zoh}(s)G(s)\}$$

$$G(z) = Z\{\frac{1-e^{-sT}}{s}\frac{K}{s(\tau s+1)}e^{-sL}\} = K(1-e^{-sT})e^{-sL}Z\{\frac{1}{s^2}-\frac{\tau}{s}+\frac{\tau}{s+1/\tau}\}$$

$$G(z) = K(1-e^{-sT})e^{-sL}Z\{\frac{1}{s^2}-\frac{\tau}{s}+\frac{\tau}{s+1/\tau}\}$$

$$G(z) = K(1-z^{-1})z^{-d}Z\{\frac{Tz}{(z-1)^2}-\frac{\tau z}{(z-1)}+\frac{\tau z}{z-A}\}, A = e^{-T/\tau}, d = L/T$$

$$G(z) = K(1-z^{-1})z^{-d}Z\{\frac{Tz}{(z-1)^2}-\frac{\tau z}{(z-1)}+\frac{\tau z}{z-A}\}$$

Aşağıdaki dönüşümler ile ayrık transfer fonksiyonuna geçilebilir:

$$K_z = K(T-\tau+A\tau)$$

$$b0 = -\frac{TA+\tau A-\tau}{T-\tau+\tau A}$$

$$a1 = -(1+A)$$

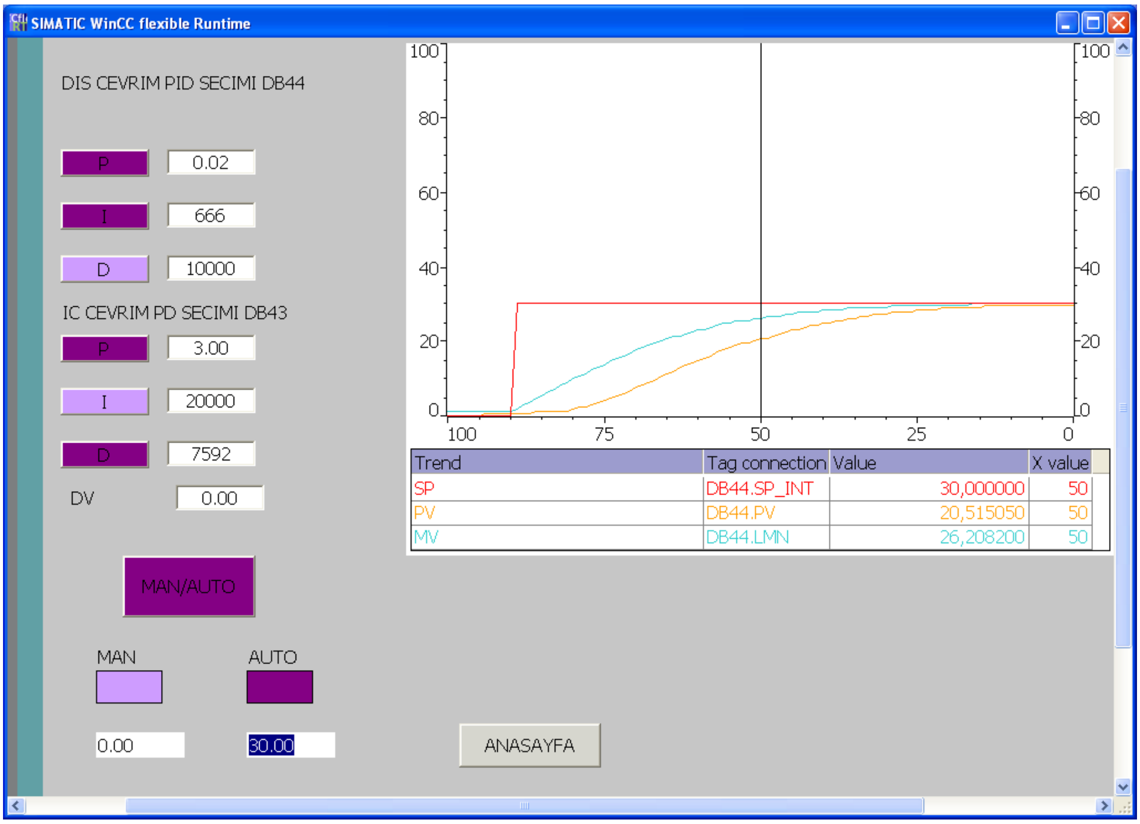
$$a0 = A$$

Böylece kaldırma düzeneğine ilişkin z düzlemi transfer fonksiyonu şöyle bulunabilir:

$$G(z) = K_z \frac{z+b0}{(z-1)(z-A)} z^{-d}$$

Bilinenlerden yola çıkılarak transfer fonksiyonu şu şekilde bulunmuştur:

$$G(z) = \frac{1.659e-005z+1.652e-005}{z^2-1.987z+0.9868} z^{-50}$$


SIMATIC WinCC flexible Runtime
DIS CEVRIM PID SECIMI DB44
P 0.02
I 666
D 10000
IC CEVRIM PD SECIMI DB43
P 3.00
I 20000
D 7592
DV 0.00
MAN/AUTO
MAN
AUTO
0.00
30.00
ANASAYFA
Trend | Tag connection | Value | X value
SP | DB44.SP_INT | 30,000000 | 50
PV | DB44.PV | 20,515050 | 50
MV | DB44.LMN | 26,208200 | 50