

SERVO DENETİMLİ HİDROLİK SİSTEMLERİN BENZETİMİ

M. Burak GÜRCAN
İlhan BAŞÇUHADAR
Tuna BALKAN

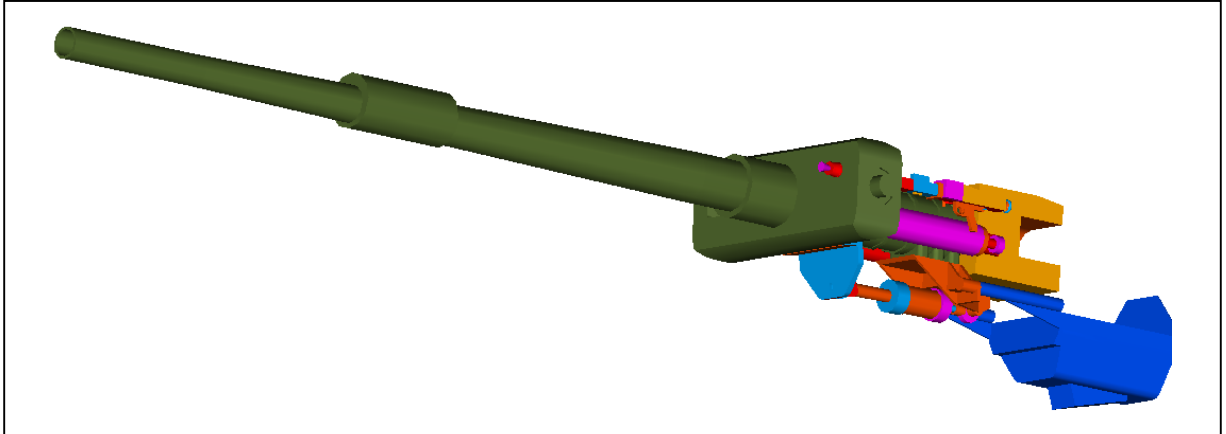
ÖZET

Bu çalışmada servo denetimli bir hidrolik sistemin MATLAB®/SIMULINK yazılımı kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Örnek olarak, ASELSAN A.Ş.'de yürütülmekte olan bir proje kapsamında tank kulesinin yükseliş eksenini süren hidrolik sistem ele alınmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında sistemin ana birimleri olan hidrolik servoblok, hidrolik silindir ve tankın yükseliş ekseninin matematik modeli oluşturulmuş, hidrolik akışkanın sıkıştırılabilirliği modellenmiştir. Daha sonra bu modeller MATLAB®/SIMULINK ortamına aktarılarak sistemin dinamik modeli elde edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise bu model kullanılarak, sistemin basamak ve frekans tepkisi testlerinin benzetimi yapılmıştır. Bu testlerin sonuçları gerçek sistem üzerinde yapılan testlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve benzetimin doğrulanması sağlanmıştır. Böylece, benzetim üzerinde yapılan çalışmalarla denetleç türünün seçimi ve parametrelerinin iyileştirilmesi bilgisayar ortamında kolaylıkla gerçekleştirilmiştir.

1. GİRİŞ

Sistemlerin bilgisayar ortamında benzetiminin hazırlanması, tasarım sırasında gerekli çalışmaların gerçek sistem üzerinde yapılması yerine bilgisayar ortamında yapılmasına olanak sağlar. Böylece daha az zaman ve daha az kaynak harcanarak sistemin istenilen performans düzeyine getirilmesi sağlanmış olur.

Bu çalışmada, ASELSAN A.Ş.'de yürütülen bir proje kapsamında tank kulesinin yükseliş ekseninin bilgisayar ortamında benzetimi hazırlanmıştır. Şekil 1.1'de tank yükseliş ekseninin üç boyutlu katı cisim modeli görülmektedir.

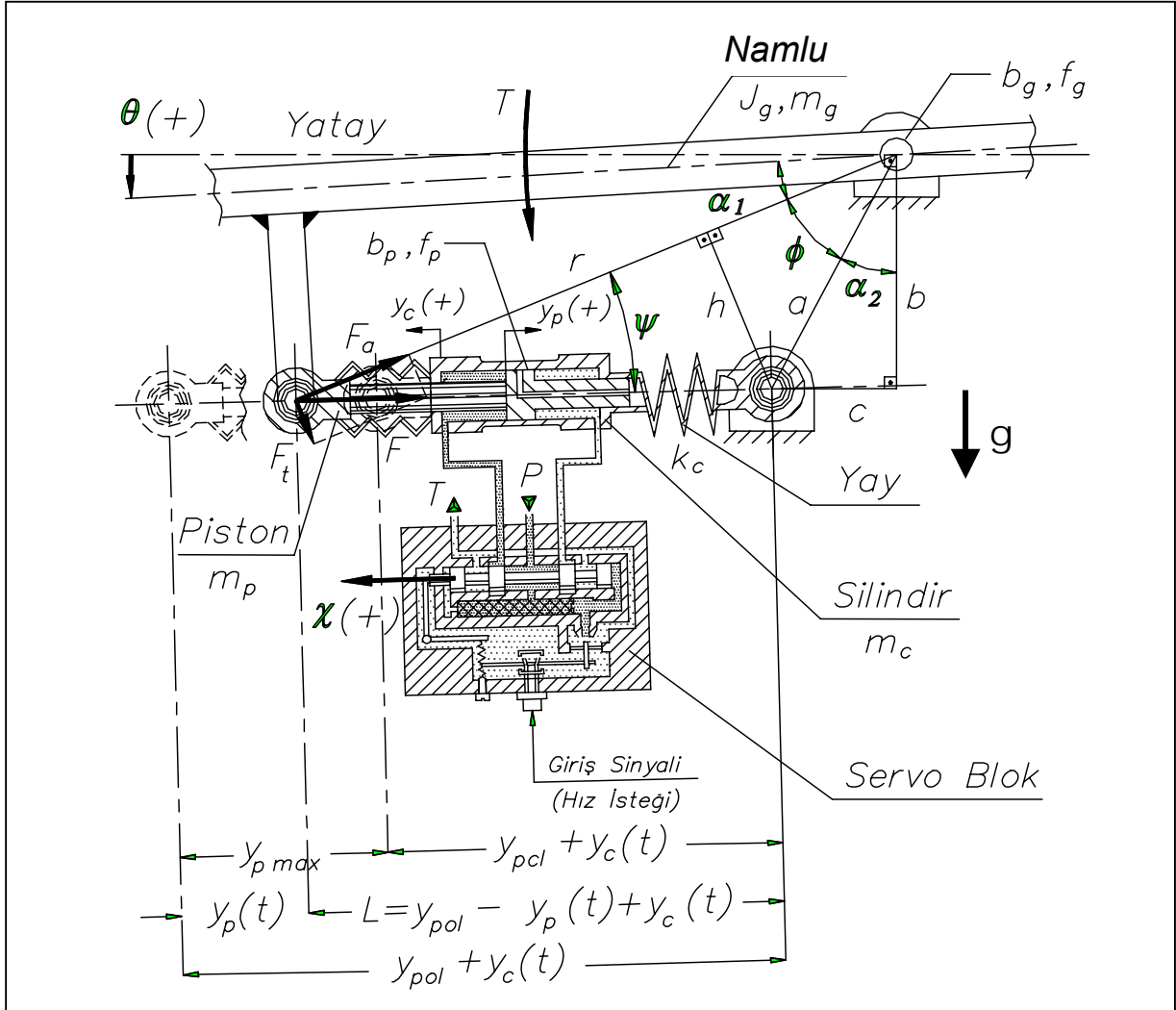


Şekil 1.1. Tank yükseliş ekseninin üç boyutlu katı cisim modeli

Çalışmada öncelikle tank kulesinin yükseliş eksenini oluşturan namlu ve hidrolik silindirin fiziksel modeli verilmiştir. Sistemin hareket denklemleri tanımlanmış, ayrıca namlyu süren hidrolik sistem için de gerekli denklemler oluşturulmuş, böylece tüm sistemin matematik modeli hazırlanmıştır. Bu modelin MATLAB®/SIMULINK ortamına aktarılmasıyla sistemin bilgisayar ortamında benzetimi elde edilmiştir [1,2]. Benzetimde kullanılan dinamik parametrelerin değerleri deneysel yöntemler ve I-DEAS® katı modelleme yazılımı kullanılarak bulunmuştur. Benzetimin doğrulanması amacıyla, gerçek sistem üzerinde ve benzetim kullanılarak çeşitli testler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, benzetimin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği, bu haliyle iyileştirme çalışmalarında kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Böylece, denetleç türü ile denetleç parametrelerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi çalışmaları bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir.

2. FİZİKSEL MODEL

Yükseliş eksenini, tankın bazı elektro-optik ve silah sistemlerini taşıyan ve hidrolik bir silindir ile bunların hedefe yükseliş yönünde otomatik olarak yönlendirmelerini sağlayan yapıdır.



Şekil 2.1. Yükseliş ekseninin fiziksel modeli

Yükseliş eksenini, kuleye bağlantısının sağlandığı beşik adı verilen ana mil ve bu milin üzerinde bulunan elektro-optik birimler, 12.7 mm'lik makinalı tüfek, 105 mm'lik namlu, hidrolik silindir, servoblok, açısız konum okuyucu ve açısız hız okuyucudan meydana gelmiştir .

Namlunun yükseliş ekseninde kuleye göre hareketini sağlayan hidrolik silindir, sabit olan ucundan tank kulesine, hareketli ucundan da namluya monte edilmiştir. Namlu, iki yatak ile kuleye bağlanmış olan beşik tarafından taşınmaktadır.

Şekil 2.1'de yükseliş ekseninin fiziksel modeli verilmiştir. Modelde, açısız ve doğrusal hareket serbestliğine sahip birimlerin açısız ve doğrusal hızları ($\dot{\theta}$, \dot{y}_p , \dot{x}), kütle elemanların atalet ve kütleleri (J , m), yük ileten birimlerin esneklikleri (k), yataklardaki ve silindir-piston arasındaki viskoz sürtünmeler (sırasıyla b_g , b_p) tanımlanmıştır.

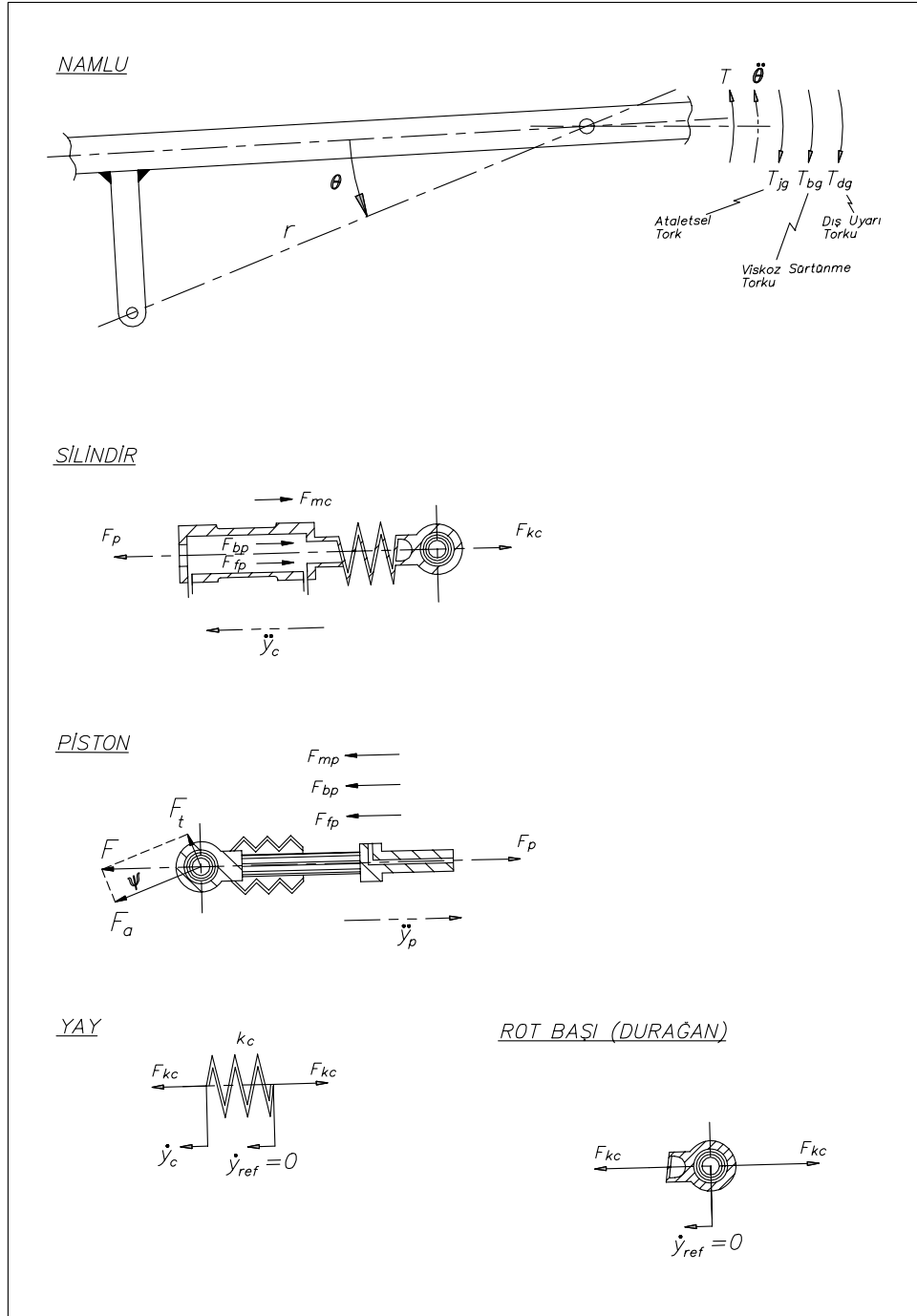
Atalete sahip elemanların serbest cisim diyagramları ile bu elemanların üzerlerine etkiyen torklar ve kuvvetler Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Yükseliş ekseninde, namlu, silindir ve piston olmak üzere üç ayrı atalet elemanı vardır. Beşiğin, üzerine bağlanan birimler arasında açısız hız farkı oluşmayacak kadar sağlam olduğu kabul edilmiştir. Sistemde sadece silindir ile silindirin bağlantı noktası arasında doğrusal esneklik olduğu kabul edilmiş ve bu esneme bir yay elemanı ile modellenmiştir.

Modelleme amacıyla yükseliş ekseninin enerji depolayan, sönmüleyen ya da aktaran yay, damper, esnek olmayan braket ya da kütle gibi ideal elemanlardan oluşturduğu kabul edilmiştir. Sistemin matematik modelinin oluşturulmasında kullanılan parametre ve değişkenler aşağıda tanımlanmıştır.

$\dot{\theta}$	Yükseliş ekseninin (namlunun) açısız hızı
\dot{y}_p	Pistonun doğrusal hızı
\dot{y}_c	Silindirin doğrusal hızı
$\dot{y}_{p/c}$	Pistonun silindire göre doğrusal bağımlı hızı
T_{dg}	Ağırlık merkezi kaçıklığı ve yol bozukluğu nedeniyle namluya uygulanan dış uyarı torku
m_g	Yükseliş ekseninin kütlesi
m_p	Pistonun kütlesi
m_c	Silindirin kütlesi
J_g	Yükseliş ekseninin ataleti
b_g	Beşiğin yatağının viskoz sürtünme katsayısı
b_p	Silindir ile piston arasındaki viskoz sürtünme katsayısı
k_c	Silindir ile kule arasındaki bağlantının esnekliği
P	Hidrolik silindirin birinci ve ikinci bölmelerinde bulunan akışkan basınçlarının farkı
A	Hidrolik silindirin net akış kesit alanı
y_{pol}	Silindir – piston ikilisinin piston sonuna kadar açıkken uzunluğu
r	Moment kolu
a	Namlu ile silindirin kuleye bağlantı noktaları arasındaki uzunluk
ϕ	a ve r doğruları arasında kalan açı
ψ	Piston ile silindirin bağlantı uçlarını birleştiren doğru ile r doğrusu arasındaki açı

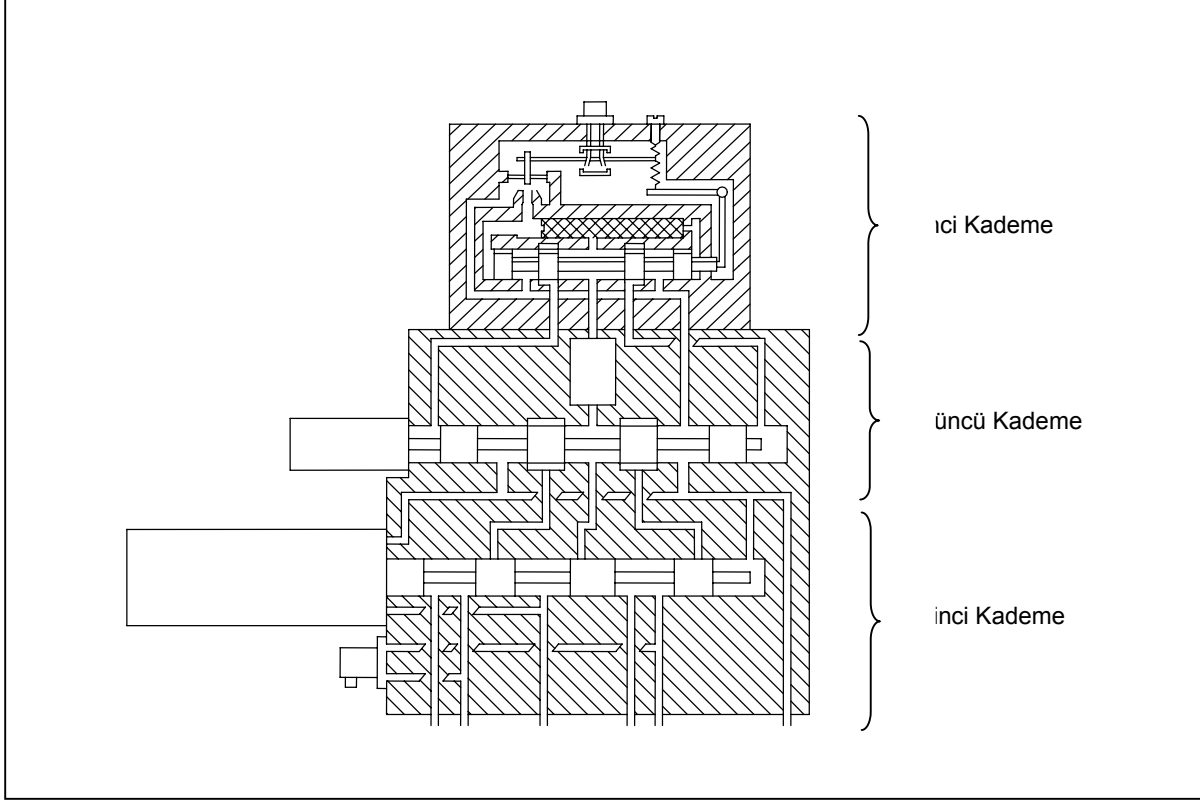
Namlunun hareketini sağlayan hidrolik silindir üç kademeli bir servovalf tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 2.3). Birinci kademe ön yönetim valfinden oluşmaktadır. Ön yönetim valfi kapalıyken servovalfe basınçlı hidroliğin girmesi engellenmektedir. Servovalfin çalışır duruma gelmesi için ön yönetim valfinin

açılması gerekir. Üçüncü kademeye gelen basınçlı hidrolik akışkan bu kademede bulunan makara ile hidrolik silindire yönlendirilir. İkinci kademeden gelen hidrolik akışkan ile kontrol edilen üçüncü kademe makarasının konumu LVDT (Linear Variable Differential Transducer) tarafından algılanır ve denetleç birimine aktarılır. İkinci kademeden üçüncü kademeye doğru olan akış, ikinci kademe makarasını hareket ettiren servo komutu tarafından sağlanır. Bu komut denetleç birimi tarafından servovalfe gönderilmektedir. Servovalfin çıkış uçlarına bağlı bulunan basınç algılayıcı, sistemde oluşan yük basıncını denetleç birimine aktarır.



Şekil 2.2. Atalet ve kütle elemanların serbest cisim diyagramları

Sistemin normal ve stabilize olmak üzere iki ayrı çalışma durumu vardır. Normal çalışma durumunda, yükseliş ekseninin kullanıcının tutamaklarla verdiği hız isteğine göre hareket etmesi beklenmektedir. Yükseliş ekseninin doğrultusunu koruma gereksinimi olmadığı için, bu durumda sisteme herhangi bir denetim uygulanmamakta ve bu yüzden de namlu, tankın hareket ettiği araziden kaynaklanan bozucu etkenlere maruz kalmaktadır. Normal çalışma sırasında, yükseliş silindirisinin altında bulunan servovalf devrede değildir.



Şekil 2.3. Servovalfin şematik gösterimi

Stabilize çalışma durumunda, normal çalışma durumundan farklı olarak, yükseliş ekseninin doğrultusunu koruma gereksinimi vardır. Bu yüzden namlunun, tankın hareket ettiği araziden kaynaklanan bozucu etkenlerden bağımsız olarak, kullanıcının verdiği hız isteğine göre hareket etmesi beklenmektedir. Bu amaçla beşik içinde bulunan yükseliş eksenini jiroskobundan alınan açısal hız geri besleme bilgisi, LVDT'den alınan üçüncü kademe makarasının konum bilgisi, basınç algılayıcıdan alınan yük basıncı bilgisi ve kule üzerinde bulunan jiroskoptan alınan bozucu açısal hız bilgisi denetleç birimine aktarılmaktadır. Denetleç birimi, bu bilgileri bir denetleç algoritması çerçevesinde değerlendirerek servovalfe hız isteği uygular. Bu çalışma durumunda, yükseliş silindirisinin altında bulunan servovalf devrededir. Uygulanan hız isteği hidrolik silindire akış oluşmasını sağlar. Akış hızı servoblok içerisinde bulunan üçüncü kademe makarasının konumu ile bağıntılıdır.

3. MATEMATİK MODEL

Tanımlanan parametre ve değişkenler ile atalet elemanlarının serbest cisim diyagramları kullanılarak sistemin eleman ve süreklilik denklemleri oluşturulmuştur. Daha sonra eleman denklemleri süreklilik denklemlerine yerleştirilerek, aşağıdaki hareket denklemleri elde edilmiştir;

$$Fr \sin \psi - T_{dg} = J_g \ddot{\theta} + b_g \dot{\theta} \quad (3.1)$$

$$PA - k_c y_c = m_c \ddot{y}_c + b_p \dot{y}_{p/c} \quad (3.2)$$

$$PA - F = m_p \ddot{y}_p + b_p \dot{y}_{p/c} \quad (3.3)$$

Pistonun konum, hız ve ivmesini, namlunun açısıl konum, hız ve ivmesi cinsinden ifade etmek için sistemin kinematik denklemleri aşağıdaki verildiği gibi oluşturulmuştur;

$$y_p = y_{pol} - u_1^{1/2} \quad (3.4)$$

$$\dot{y}_p = r.a. \sin \phi \cdot \dot{\theta} \cdot u_1^{-1/2} \quad (3.5)$$

$$\ddot{y}_p = (r.a. \sin \phi \cdot \ddot{\theta} - r.a. \cos \phi \cdot \dot{\theta}^2) u_1^{-1/2} + u_2 \cdot u_1^{-3/2} \cdot r.a. \sin \phi \cdot \dot{\theta} \quad (3.6)$$

Bu denklemde y_p , \dot{y}_p , \ddot{y}_p sırasıyla pistonun konumunu, hızını ve ivmesini gösterirken, θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ namlunun açısıl konum, hız ve ivmesini göstermektedir. Denklemlerdeki u_1 ve u_2 parametreleri ise şöyle tanımlanmıştır;

$$u_1 = r^2 + a^2 - 2.r.a. \cos \phi \quad (3.7)$$

$$u_2 = r.a. \sin \phi \cdot \dot{\theta} \quad (3.8)$$

Pistonun silindire göre bağıl konumunu, piston ve silindirin konumlarına göre veren denklem şöyledir;

$$y_{p/c} = y_p + y_c \quad (3.9)$$

Aynı şekilde, pistonun silindire göre bağıl hızı ve ivmesi de ($\dot{y}_{p/c}$, $\ddot{y}_{p/c}$), aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir;

$$\dot{y}_{p/c} = \dot{y}_p + \dot{y}_c \quad (3.10)$$

$$\ddot{y}_{p/c} = \ddot{y}_p + \ddot{y}_c \quad (3.11)$$

(3.1), (3.2), (3.3), (3.4) ve (3.9) denklemlerinden oluşan beş denklemlik set, üç gerilim değişkeni (θ , \dot{y}_p , \dot{y}_c), bir bağıl gerilim değişkeni ($\dot{y}_{p/c}$) ve pistonun namluya uyguladığı itme kuvvetinden (F) oluşan beş bilinmeyen cinsinden yazılmış tam bir denklem sistemini oluşturmaktadır. Denklem sisteminin çıktısı namlunun açısıl hızıdır. Ayrıca, (3.5), (3.6), (3.10), (3.11) denklemlerinden oluşan dört denklemlik set (3.4) ve (3.9) denklemlerini tamamlayıcı nitelikte olup sadece gerilim değişkenlerinin birinci ve ikinci türevlerinin bulunmasında kullanılmaktadır.

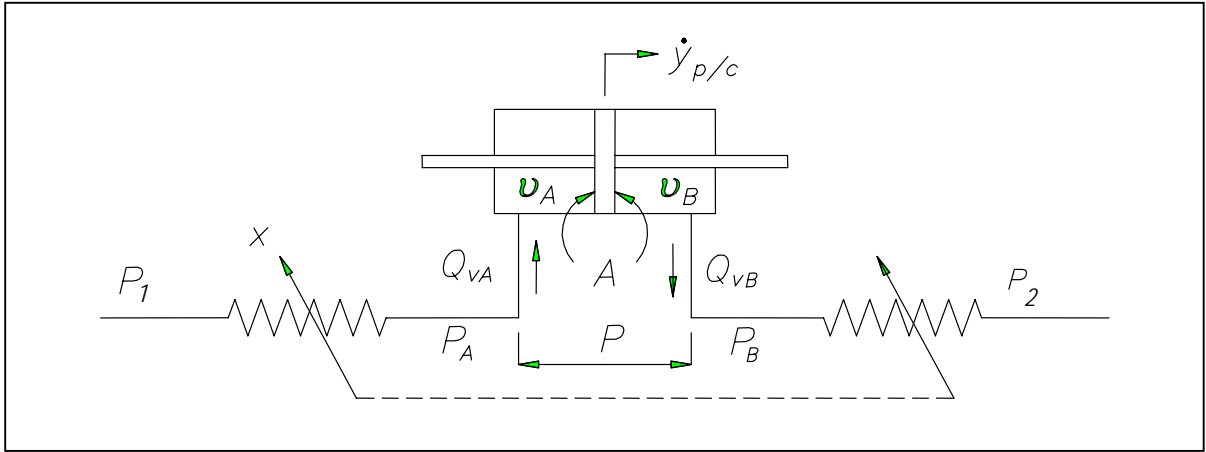
4. HİDROLİK MODEL

Çift etkili yükseliş ekseni pistonunun servoblok tarafından kontrol edilişi Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Servobloğun üçüncü kademesinin, açıklığı x (makara konumu) olan iki adet orifisten oluştuğu, makara orta konumdayken x değerinin sıfır olduğu, makara bir yöne hareket ederken x 'in pozitif, diğer yöne hareket ederken de negatif değerler aldığı kabul edilmiştir. Silindirin A bölmesi

tarafındaki orifisin arkasındaki hidrolik akışkanın basıncı P_1 , B bölümü tarafındaki orifisin arkasındaki hidrolik akışkanın basıncı da P_2 olarak tanımlanmıştır.

x değerinin sıfırdan büyük olduğu durumda piston, sabit kaynak basıncına (P_s) eşit olan P_1 basıncı tarafından sürülürken, P_2 basıncı da çıkış basıncına (P_e) eşit olmaktadır. Bu durumda silindirin A bölümü tarafındaki orifisten geçen akışkanın debisi, Q_{VA} , aşağıdaki orifis denkleminde ifade edilmiştir [3];

$$Q_{VA} = k \cdot |x| \cdot \text{sign}(P_1 - P_A) \cdot \sqrt{|P_1 - P_A|} \quad (4.1)$$



Şekil 4.1. Hidrolik sistem modeli

Hidrolik akışkanın sıkıştırılabilir olduğu kabul edilirse, bu durumdaki akış sürekliliği denklemi de aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$Q_{VA} = A \dot{y}_{p/c} + \frac{v_A}{\beta} \dot{P}_A \quad (4.2)$$

(4.1) ve (4.2) no'lu denklemlerde

- A Silindir üzerindeki akış kesit alanı
- β Bulk modülü
- v_A Silindirin A bölümünün hacmi
- $y_{p/c}$ Pistonun silindire göre konumu
- P_A Silindirin A bölümü tarafındaki orifisle yük arasındaki akışkanın basıncı
- $\dot{y}_{p/c}$ Pistonun silindire göre bağıl hızı

olarak tanımlanmıştır. Ayrıca (4.1) no'lu denklemlerde kullanılan $k \cdot x$ çarpımı orifisin hidrolik iletkenliği olup aşağıdaki denklemle ifade edilir;

$$k \cdot x = C_d w x \sqrt{\frac{2}{d}} \quad (4.3)$$

Bu denklemdaki parametrelerin tanımları da şöyledir;

- C_d Boşaltma katsayısı (keskin kenarlı orifislerde ortalama 0.625 alınır)
 w Orifisin makara çevresi boyunca genişliği
 d Hidrolik akışkanın yoğunluğu

x değerinin sıfırdan küçük olduğu durumda ise piston, sabit kaynak basıncına (P_s) eşit olan P_2 basıncı tarafından sürülmekte, P_1 basıncı da çıkış basıncına (P_e) eşit olmaktadır. Bu durumdaki orifis ve akış sürekliliği denklemleri diğer duruma benzer olarak aşağıdaki şekilde yazılmıştır:

$$Q_{VB} = k \cdot |x| \cdot \text{sign}(P_B - P_2) \cdot \sqrt{|P_B - P_2|} \quad (4.4)$$

$$Q_{VB} = A \dot{y}_{p/c} - \frac{v_B}{\beta} \dot{P}_B \quad (4.5)$$

Bu denklemlerde de

- Q_{VB} Silindirin B bölümü tarafındaki orifisten geçen akışkanın debisi
 P_B Silindirin B bölümü tarafındaki orifisle yük arasındaki akışkanın basıncı
 v_B Silindirin B bölümünün hacmi
 y_{\max} Piston kursu

olarak tanımlanmıştır. Piston üzerindeki net basınç farkını (P) veren denklem de şöyledir;

$$P = P_A - P_B \quad (4.6)$$

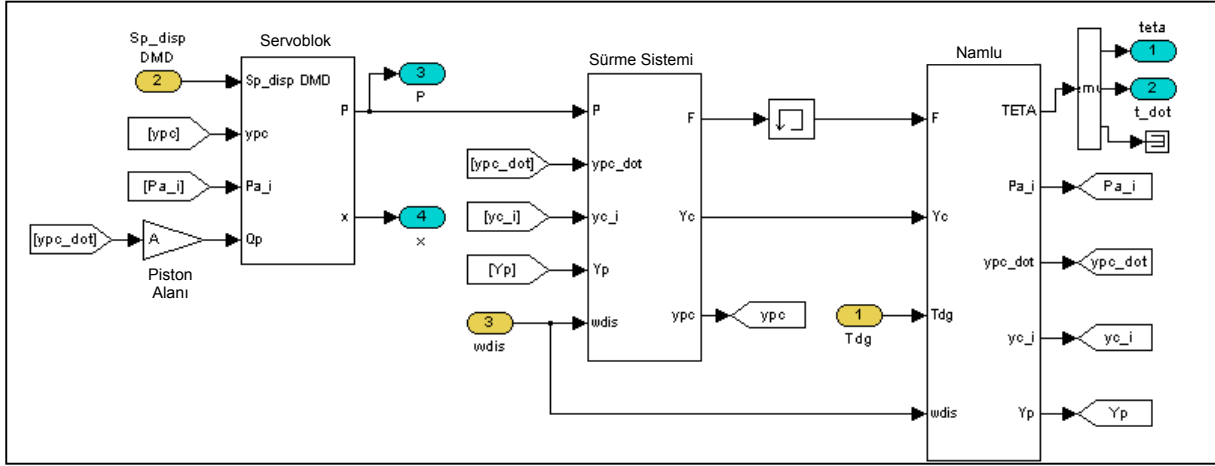
Hidrolik model göz önüne alındığında, (4.1), (4.2), (4.4), (4.5) ve (4.6) no'lu denklemlerden oluşan set, Q_{VA} , Q_{VB} , P_A , P_B ve P olmak üzere beş adet bilinmeyen cinsinden yazılarak tam bir denklem sistemini oluşturmuştur. Pistonun silindire göre bağıl hızı ve orifis açıklığı bu denklem sisteminin girdileri, piston üzerindeki net basınç farkı da sistemin çıktısıdır.

5. MATLAB/SIMULINK® BENZETİMİ

5.1. Yükseliş Ekseni Dinamiği Modeli

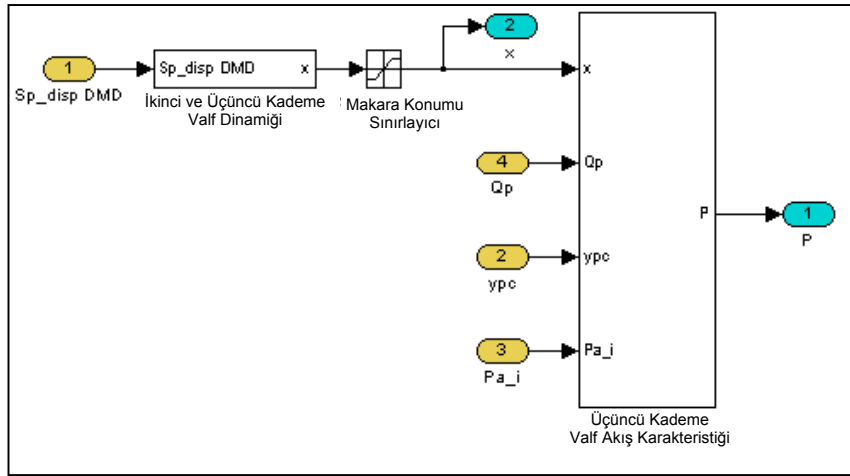
Şekil 5.1.1.'de yükseliş ekseni dinamiğinin MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanmış modeli görülmektedir. *Yükseliş Ekseni Dinamiği Modeli*; *Servoblok*, *Sürme Sistemi* (hidrolik silindir) ve *Namlu* olmak üzere üç ayrı bloktan oluşmuştur. Namlu üzerindeki bozucu tork (T_{dg}) bozucu açısal hız (w_{dis}) ve servobloğa uygulanan istek sinyali (Sp_disp_DMD) modele girdi olarak alınırken, piston üzerindeki net basınç (P), makara konumu (x), yükseliş ekseninin açısal konumu ($teta$) ve açısal hızı (t_dot) model tarafından hesaplanıp dışarıya çıktı olarak verilmektedir.

Servoblok modelinin ayrıntılı gösterimi Şekil 5.1.2'de verilmiştir. *İkinci ve Üçüncü Kademe Valf Dinamiği* ve *Üçüncü Kademe Valf Akış Karakteristiği* bloklarından oluşan bu model, servobloğa uygulanan istek sinyali (Sp_disp_DMD), pistonun silindire göre hareketinden kaynaklanan akış (Q_p), pistonun silindire göre bağıl konumu (y_{pc}) ve silindirin A bölümündeki başlangıç basıncı (PA_i) değerlerinden, piston üzerindeki net basınç ve makara konumu değerlerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. *İkinci ve Üçüncü Kademe Valf Dinamiği* modelinde, makaranın dinamiği birinci dereceden bir transfer fonksiyonuyla modellenmiştir. Bu transfer fonksiyonu ve makaranın konumunun başlangıç değeri kullanılarak servobloğa uygulanan istek sinyalinden makaranın konumu hesaplanmaktadır.



Şekil 5.1.1. MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanmış yükseliş eksenini dinamiği modeli

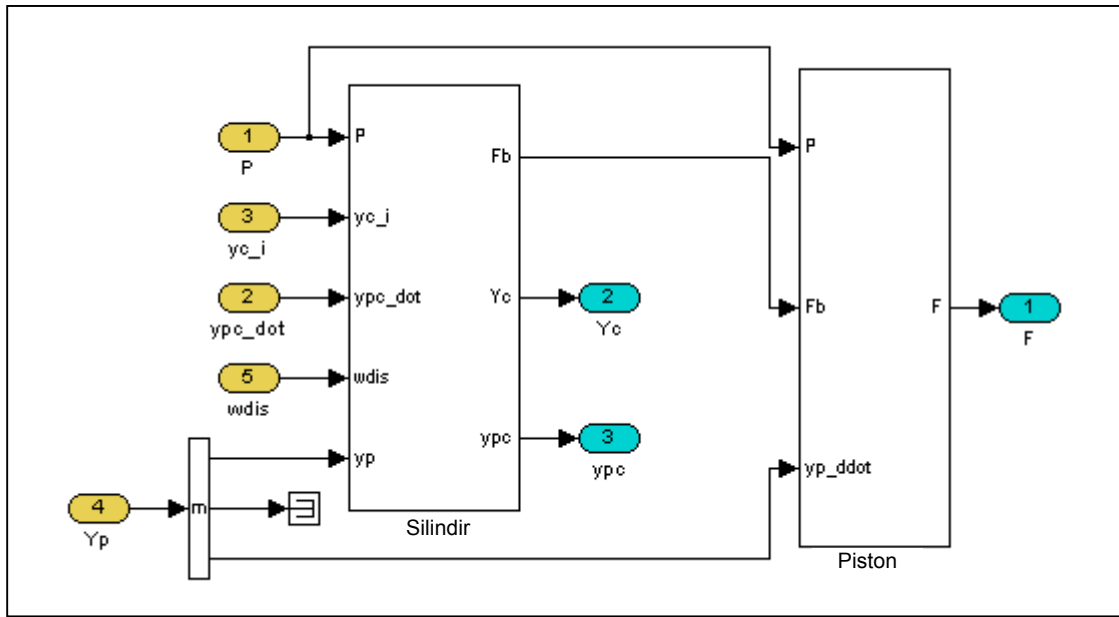
Bulunan makaranın konumu değeri , pistonun silindire göre hareketinden kaynaklanan akış, pistonun silindire göre bağlı konumu silindirin A bölümündeki başlangıç basıncı değerleri ile birlikte *Üçüncü Kademe Valf Akış Karakteristiği* bloğuna girerek hidrolik piston üzerindeki basıncın hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu blok içinde, (4.1), (4.2), (4.4), (4.5) ve (4.6) denklemlerinden oluşan beş denklemlilik çözümünü yapılmaktadır.



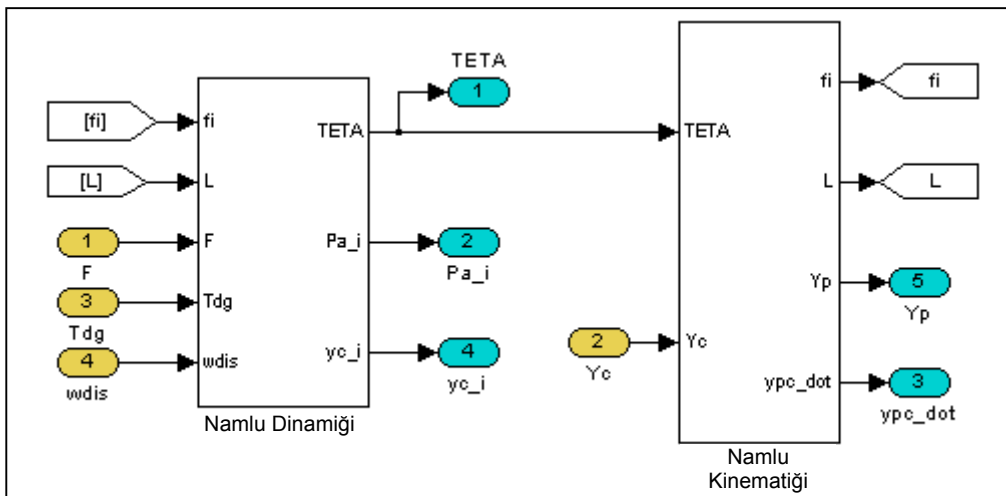
Şekil 5.1.2. MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanmış servoblok modeli

Yükseliş Eksenini Dinamiği Modeli'ni oluşturan bloklardan ikincisi olan *Sürme Sistemi* (hidrolik silindir) bloğunun açık hali Şekil 5.1.3 'te verilmiştir. Bu blokta net basınç (P), pistonun silindire göre bağlı hızı (ypc_dot), silindirin başlangıç konumu (yc_i), pistonun doğrusal konumu ve ivmesi (Yp) ile namlu üzerindeki bozucu açısal hız ($wdis$) parametreleri girdi olarak kullanılmaktadır. *Sürücü Sistem* modelini oluşturan bloklardan *Silindir* modeli, silindir ile piston arasındaki viskoz sürtünmeyi yenmek için gerekli kuvvet (Fb), silindirin doğrusal konumu, hızı ve ivmesi (Yc) ve pistonun silindire göre bağlı konumu (ypc) değerlerinin bulunması için kullanılmaktadır. *Silindir* modelinde, silindirin esnekliği ve silindire piston arasındaki viskoz sürtünme etkisi modele dahil edilmiştir. *Piston* modelinde ise, silindir içindeki basınçtan dolayı oluşan kuvvetten, pistonun kütesinin hareket ettirilmesi için gerekli kuvvet ile piston ve silindir arasındaki viskoz sürtünmeyi yenmek için gerekli kuvvet çıkartılarak pistondan alınan net sürme kuvveti (F) hesaplanmıştır.

Yükseliş Ekseni Dinamiği Modeli'ni oluşturan üçüncü blok *Namlu* modelidir (Şekil 5.1.4). *Namlu* modeli, pistondan alınan net sürme kuvveti (F), namlu üzerindeki bozucu tork (T_{gd}), namlu üzerindeki bozucu açısal hız (w_{dis}) ve silindirin konum, hız ve ivmesi (Y_c) parametreleri kullanılarak namlunun açısal konum, hız ve ivmesi ($TETA$), pistonun doğrusal konum, hız ve ivmesi (Y_p) ile pistonun silindire göre hızının (y_{pc_dot}) bulunmasını sağlamaktadır. *Namlu* modelini oluşturan iki bloktan *Namlu Dinamiği* modeli, piston tarafından uygulanan net sürme kuvveti yüzünden oluşan namlunun açısal konum, hız ve ivmesi değerlerinin bulunmasını sağlamaktadır. Bu değerler bulunurken, yol bozukluğundan kaynaklanan, namlu üzerinde oluşan dış uyarı torkunun etkisi de hesaplarda kullanılmıştır. *Namlu Dinamiği* modelinde bulunan namluya ait açısal konum, hız ve ivme bilgileri, *Namlu* modelini oluşturan ikinci blok olan *Namlu Kinematiği* modelinde kullanılır. Bu model namluya ait açısal konumu hız ve ivme bilgilerinin pistona ait doğrusal konum, hız ve ivme bilgisine çevrilmesi için kullanılmaktadır.



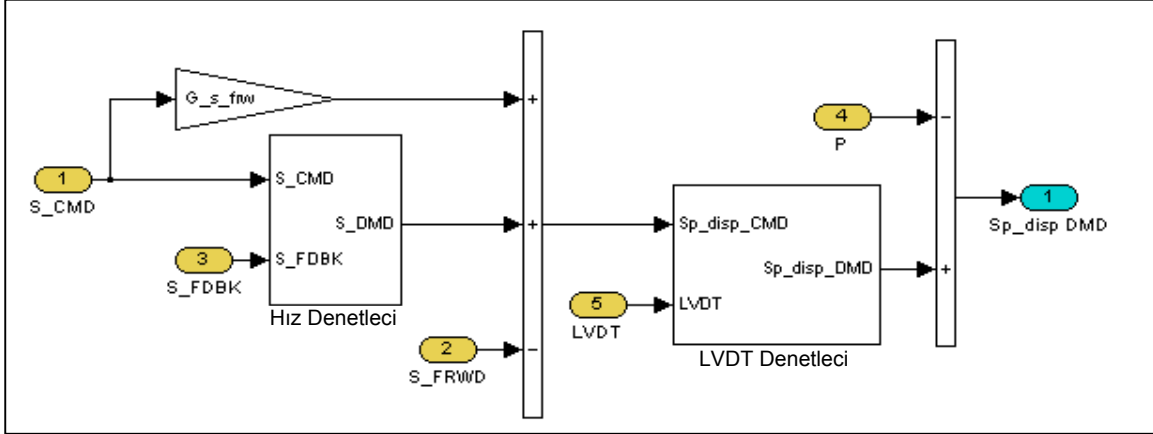
Şekil 5.1.3. MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanmış sürme sistemi (hidrolik silindir) modeli



Şekil 5.1.4. MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanmış namlu modeli

5.2. Denetleç Modeli

Sistemin hız denetimi Şekil 5.2.1’de gösterilen *Denetleç Modeli* kullanılarak yapılmaktadır. *Denetleç Modeli*’nde, hız geribeslemesi ve hız ileribeslemesi amacıyla kullanılan iki adet jiroskop, servovalf makarasının konumunu algılayan LVDT ve pistonun iki ucu arasında oluşan yük basıncını algılayan basınç algılayıcı olmak üzere toplam dört adet algılayıcı kullanılmaktadır. Hız geribeslemesi amacıyla kullanılan silah jiroskobu namlunun yükseliş eksenindeki açısal hızını algılayarak bu bilgiyi denetleç birimine iletmektedir. Hız ileri beslemesi amacıyla kullanılan kule jiroskobu ise tankın açısal hızını hız geribeslemesi olarak algılanmaktadır.



Şekil 5.2.1 MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanmış denetleç modeli

Hız komutu (S_CMD), silah jiroskobundan alınan hız geribesleme bilgisi (S_FDBK) ile karşılaştırılmak üzere *Hız Denetleci*’ne girmektedir. *Hız Denetleci* bir PID denetleçtendir. Bu denetleçten çıkan sinyal bir kazançla çarpılarak gelen hız komutu bilgisiyle toplanmaktadır. Bu toplama işlemindeki amaç sürekli rejimdeki hatanın giderilmesidir. Aynı zamanda bu iki sinyale kule jiroskobundan alınan bozucu açısal hız bilgisi (S_FRWD) toplanmaktadır. Bu toplama işleminin sonucu makara konumu (*LVDT*) bilgisiyle birlikte *LVDT Denetleci*’ne girmektedir. Bu denetleç de klasik bir PID denetleçtir. Bu denetleçten çıkan sinyal yük basıncı (*PRTR*) bilgisi ile toplanarak servovalfe uygulanacak denetim sinyalini oluşturur. Yük basıncı bilgisi toplama işlemine girmeden önce yüksek frekansları geçiren bir filtreden geçmektedir. Böylece dinamik yük basıncı geribeslemesi denetleç sinyaline eklenmektedir.

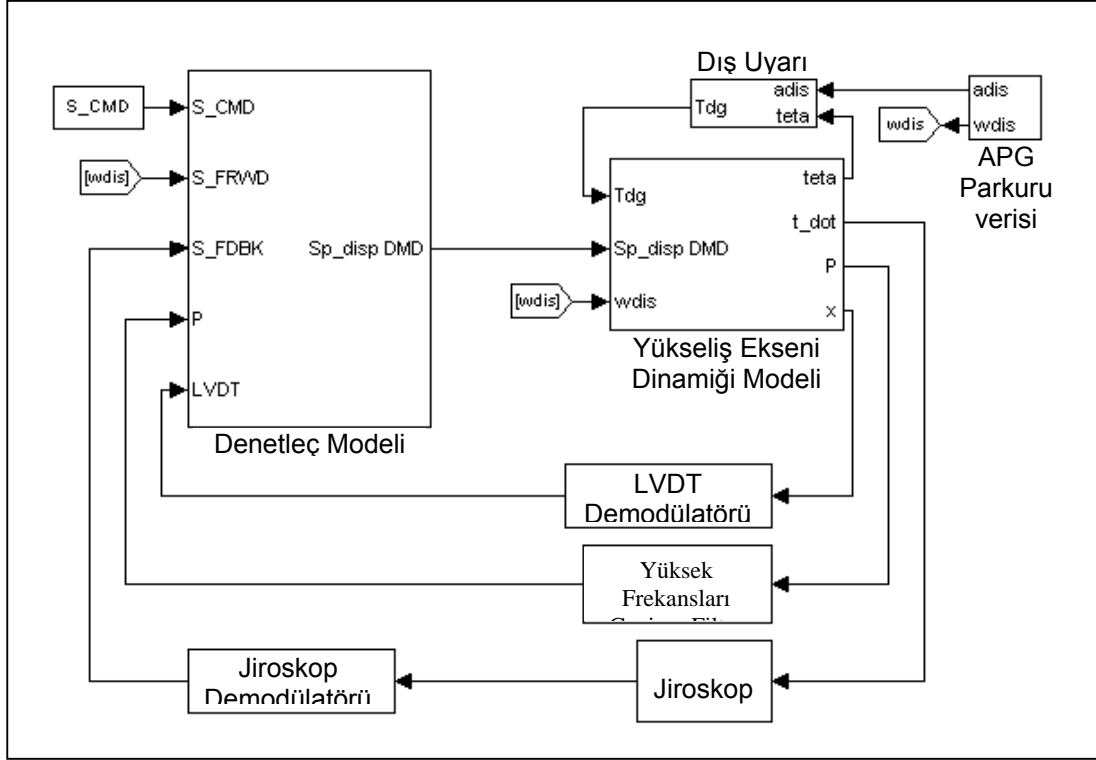
5.3. Yükseliş Ekseni Denetleç Modeli

Yükseliş Ekseni Dinamiği Modeli ile *Denetleç Modeli*’nden oluşan *Yükseliş Ekseni Denetleç Modeli* Şekil 5.3.1’de verilmiştir. Verilen hız komutu (S_CMD), algılayıcılardan gelen bilgilerle birlikte *Denetleç Modeli*’ne girmektedir. Bu modelde servovalfe uygulanacak istek (Sp_disp_DMD) hesaplanır ve bu istek *Yükseliş Ekseni Dinamiği Modeli*’ne uygulanır. *Dış Uyarı* modelinden elde edilen ağırlık merkezi kaçıklığı ve yol bozukluğu nedeniyle namluya uygulanan bozucu tork (Tdg) ile bozucu açısal hız bilgisi ($wdis$) de *Yükseliş Ekseni Dinamiği Modeli*’ne girmektedir. *Dış Uyarı* modelinin içinde, tank özel bir parkurda yol alırken toplanan açısal ivme ($adis$) ve hız ($wdis$) verileri bulunmakta ve bu veriler kullanılarak namluya uygulanan bozucu tork (Tdg) hesaplanmaktadır.

Yükseliş Ekseni Dinamiği Modeli’nden, namlunun açısal konumu ($teta$) ve hızı (t_dot), yük basıncı (P) ve servovalf makarasının konumu (x) bilgileri elde edilmektedir. Namlunun açısal hızı, ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu olarak modellenen *Jiroskop* modelinden geçmektedir. Gerçek sistem üzerinde jiroskoptan alınan sinyal modüle edilmiş bir sinyaldir ve bu sinyal denetleç birimine gelmeden önce demodülatörden geçmektedir. Benzetimin gerçeğe yakın olması için bu demodülatör de benzetime eklenmiştir. *LVDT*’den gelen servovalf makarası konum bilgisi de jiroskoptan gelen hız bilgisi gibi modüleli bir sinyaldir ve denetleç birimine demodülatörden geçerek gelmektedir. Basınç algılayıcıdan alınan basınç bilgisi ise bir filtreden geçerek *Denetleç Modeli*’ne gelmektedir.

6. PARAMETRELERİN BULUNMASI

Yükseliş Ekseni Denetleç Modeli'nin MATLAB®/SIMULINK ortamında oluşturulmasından sonra, çeşitli yöntemlerle benzetimde kullanılacak parametrelerin değerleri bulunmuştur.



Şekil 5.3.1. MATLAB/Simulink ortamında hazırlanmış yükseliş eksen denetleç modeli

I-DEAS® katı modelleme yazılımı kullanılarak tankın geometrik modeli oluşturulmuş, sistemin atalet, kütle ve kütle merkezi bilgilerini elde etmek için bu model kullanılmıştır.

Namlu yatağındaki kuru ve viskoz sürtünme değerleri sistem üzerinde yapılan testlerle bulunmuştur. Bu amaçla, silindirin hidrolik bağlantıları sökülerek namlunun serbest olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Bu durumda, namluyu hareketsiz halde iken hareket ettirmek için gerekli kuvvet ölçülerek namlu yatağındaki kuru sürtünme değeri bulunmuştur. Namluyu sabit hızla hareket ettirebilmek için gerekli kuvvetten de yataktaki viskoz sürtünme değeri bulunmuştur.

Namlunun hızı ve ivmesi gibi bilgiler, doğrudan sistem üzerinde yapılan testlerle elde edilmiştir. Sistem üzerine etki eden dış uyarı torku ve dış uyarı ivmeleri test parkurunda hareket eden tank üzerinden ölçülmüştür.

Silindir ile kule arasındaki bağlantının esnekliği ve servovalfin modellendiği transfer fonksiyonunda kullanılan parametreler benzetimin gerçek test verileriyle karşılaştırılması sonucunda bulunmuştur.

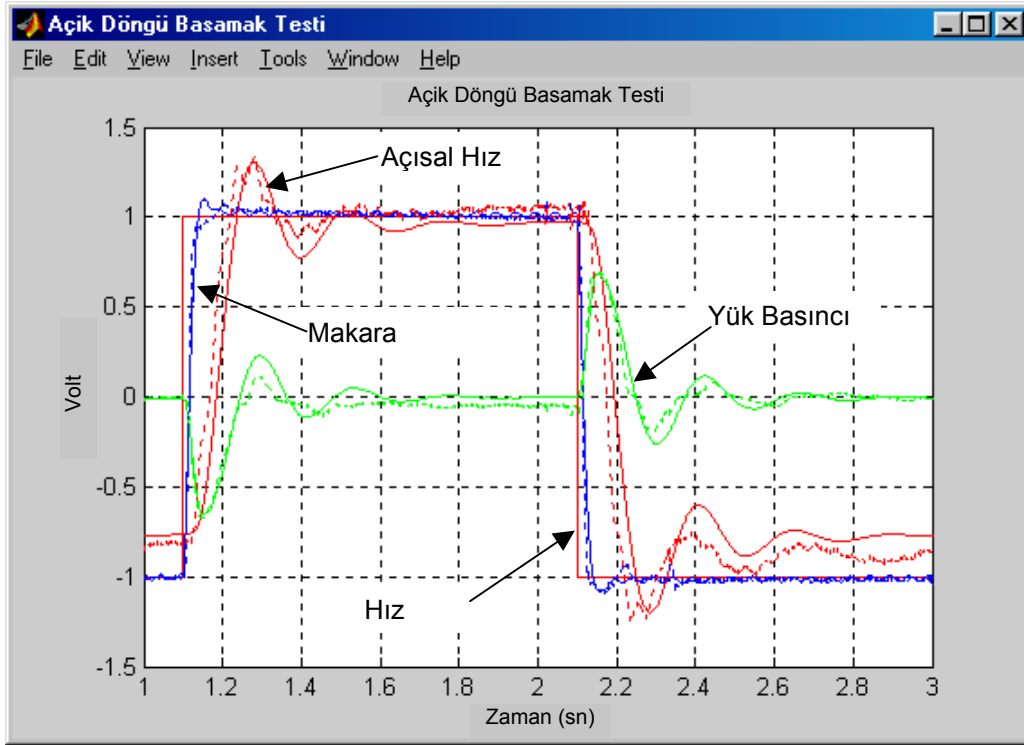
7. BENZETİMİN DOĞRULANMASI

Hazırlanan benzetim modelinin denetleç algoritması ve denetleç parametrelerinin iyileştirilmesi çalışmalarında kullanılabilmesi için, benzetimden alınan tepkilerin gerçek sistem tepkileriyle karşılaştırılarak benzetimin doğrulanması gerekmektedir. Bu amaçla gerçek sistem üzerinde, denetleç

döngüsünün açık ve kapalı olduğu durumlarda, basamak tepkisi ve frekans tepkisi testleri yapılmıştır. Testler benzetim kullanılarak bilgisayar ortamında tekrar edilmiştir. Gerçek sistemden elde edilen sonuçlarla benzetimden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

7.1. Açık Döngü Basamak Tepkisi Testlerinin Karşılaştırılması

Bu testte sistemin denetleç döngüsü açık tutularak sisteme basamak hız isteği uygulanmıştır. Test sırasında, sisteme uygulanan hız isteği, LVDT'den alınan makara konumu bilgisi, basınç algılayıcıdan alınan yük basıncı bilgisi ve yükseliş eksenli jiroskobundan alınan açısal hız bilgisi sinyalleri kaydedilmiştir. Aynı sinyaller MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanan benzetim kullanılarak da elde edilmiştir. Şekil 7.1.1'de gerçek sistemden ve benzetimden alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır.



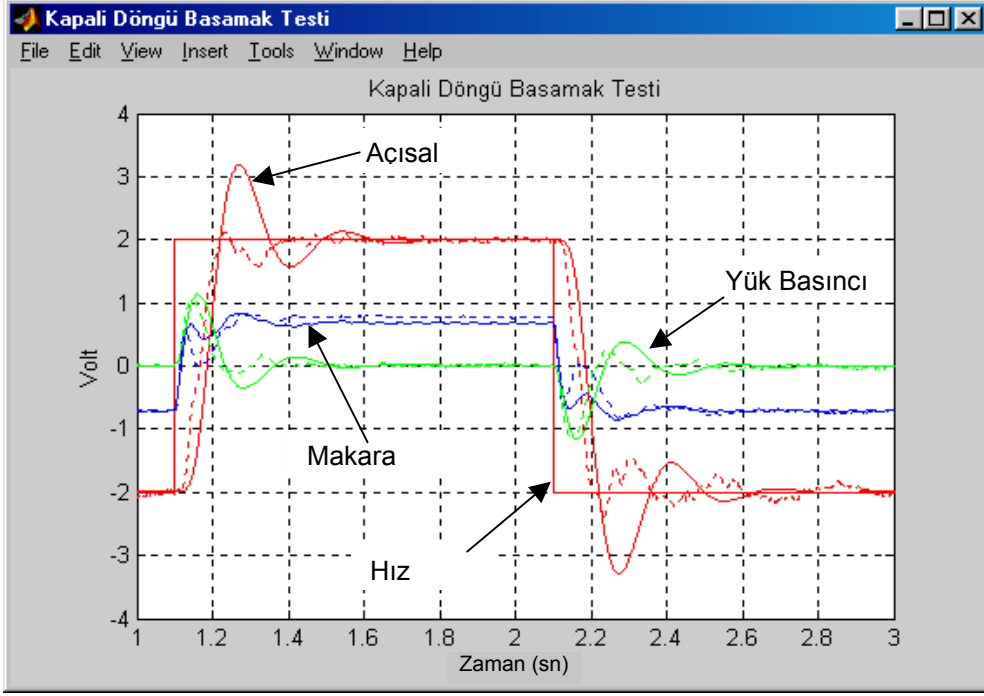
Şekil 7.1.1. Gerçek sistem üzerinde (kesikli çizgi) ve MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanan benzetim üzerinde (düz çizgi) yapılan açık döngü basamak testi

7.2. Kapalı Döngü Basamak Tepkisi Testlerinin Karşılaştırılması

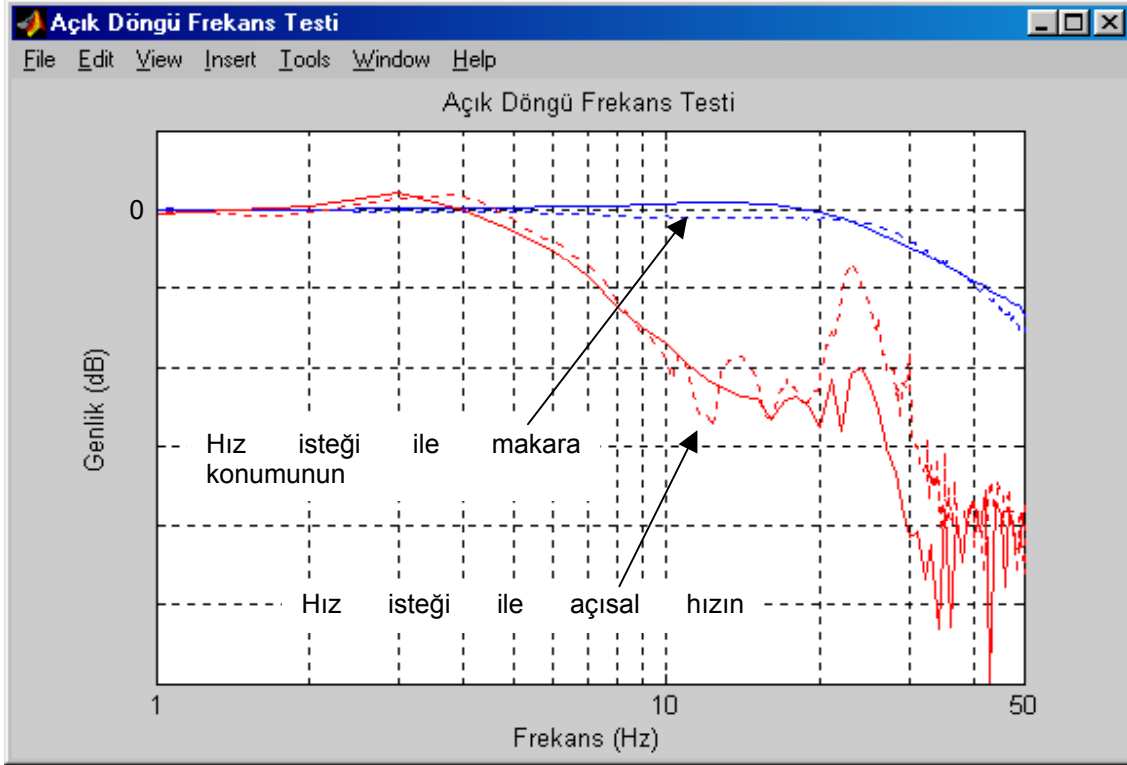
Bu testte sistemin denetleç döngüsü kapatılarak açık döngü basamak testi için yapılan testler tekrar edilmiştir. Gerçek sistem üzerinde ve benzetim kullanılarak yapılan testlerde makara konumu bilgisi, yük basıncı bilgisi ve açısal hız bilgisi sinyalleri kaydedilmiştir. Şekil 7.2.1'de gerçek sistemden ve benzetimden alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

7.3. Açık Döngü Frekans Tepkisi Testlerinin Karşılaştırılması

Bu testte, sistemin denetleç döngüsü açık tutulmuş ve sisteme hız isteği olarak frekansı 1 Hz'den 50 Hz'e kadar değişen sabit genlikli bir sinüs sinyali uygulanmıştır. Bu sinyal ile LVDT ve jiroskop sinyalleri karşılaştırılarak Şekil 7.3.1'de gösterilen Bode diyagramı elde edilmiştir. Benzetim kullanılarak yapılan aynı testin sonuçları da Şekil 7.3.1'de gösterilmiştir. Uygulanan sinüs sinyalinin büyüklüğüne göre Bode diyagramındaki genlik değerleri değiştiği için bu şekilde y-ekseni değerleri verilmemiştir.



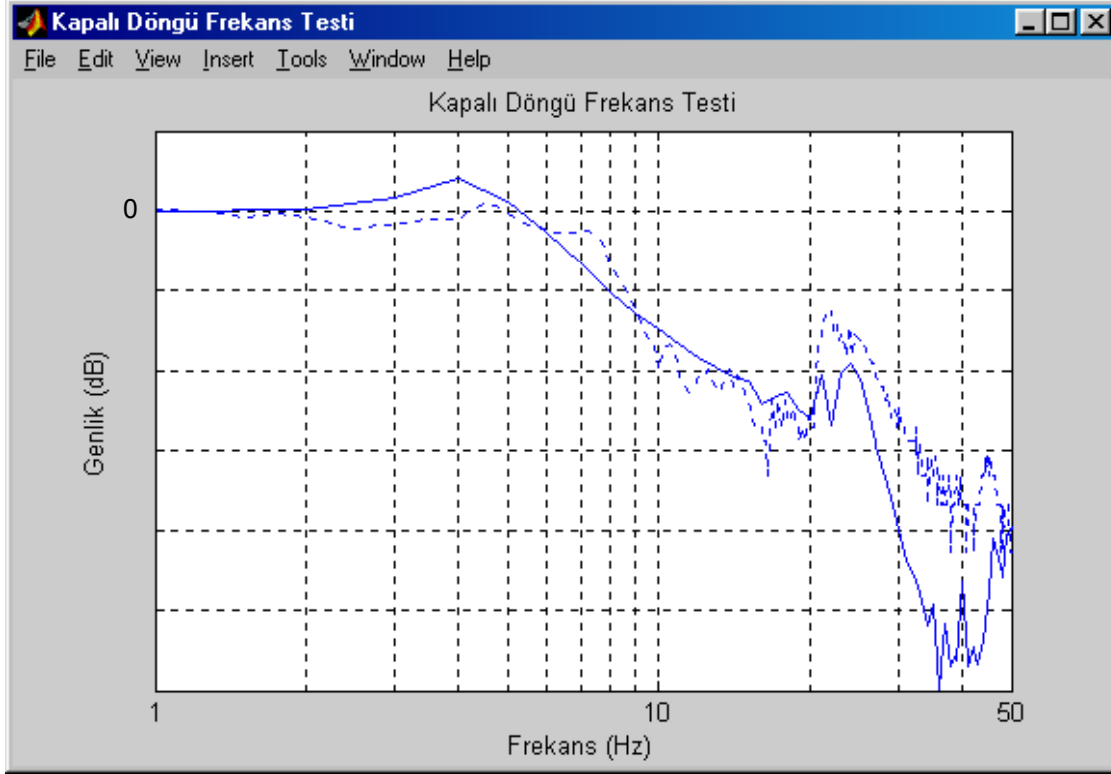
Şekil 7.2.1 Gerçek sistem üzerinde (kesikli çizgi) ve MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanan benzetim üzerinde (düz çizgi) yapılan kapalı döngü basamak testleri



Şekil 7.3.1. Gerçek sistem üzerinde (kesikli çizgi) ve MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanan benzetim üzerinde (düz çizgi) yapılan açık döngü frekans testi

7.4. Kapalı Döngü Frekans Tepkisi Testlerinin Karşılaştırılması

Bu testte, sistemin denetleç döngüsü kapatılmış ve açık döngü testlerinde olduğu gibi sisteme hız isteği olarak frekansı 1 Hz'den 50 Hz'e kadar değişen sabit genlikli bir sinüs sinyali uygulanmıştır. Bu sinyalle jiroskoptan alınan açısal hız sinyalleri karşılaştırılarak Şekil 7.4.1'de gösterilen Bode diyagramı elde edilmiştir. Aynı test hazırlanan benzetim kullanılarak tekrar edilmiş ve sonuçlar Şekil 7.4.1 'te verilmiştir. Uygulanan sinüs sinyalinin büyüklüğüne göre Bode diyagramındaki genlik değerleri değiştiği için bu şekilde y-ekseni değerleri verilmemiştir.



Şekil 7.4.1. Gerçek sistem üzerinde (kesikli çizgi) ve MATLAB®/SIMULINK ortamında hazırlanan benzetim üzerinde (düz çizgi) yapılan kapalı döngü frekans testleri

SONUÇ

Bu çalışma ile servo denetimli hidrolik bir sistemin matematik modelinin oluşturulması, bu modelin MATLAB®/SIMULINK ortamına aktarılması ve böylece sistemin dinamik analizinin yapılabileceği, denetleç algoritması geliştirilmesi ve denetleç parametrelerinin iyileştirilmesi çalışmalarının yürütülebileceği bir ortam hazırlanması amaçlanmıştır.

Parçalı ve parametrik olarak oluşturulan matematik modelde, sistemi oluşturan elemanların enerji depolama, tüketme ya da aktarma gibi tek bir işlevi yerine getirebildiği varsayılmıştır. Dinamik karakteri belirleyen atalet, ağırlık, ağırlık merkezi ve esneklik gibi bilgiler parametrik olarak modele dahil edilmiştir. Daha sonra bu model MATLAB®/SIMULINK ortamına aktarılmış ve gerçek sistemin bilgisayar ortamında benzetimi elde edilmiştir.

Sistem için uygun denetlecin ve denetleç parametrelerinin benzetim kullanılarak belirlenmesi, öncelikle o sistemin kabul edilebilir düzeyde doğru sonuçlar veren gerçeğe yakın bir modelinin oluşturulmasına

bağlıdır. Oluşturulan benzetimden alınan test sonuçlarıyla gerçek sistem üzerinde yapılan testlerin sonuçları karşılaştırıldığında, özellikle düşük frekanslarda benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Sonuçlardaki farklılıklar, namlunun esnekliği, hareketli parçalar arasındaki kuru sürtünmeler, namlu sepetinin esnekliği gibi benzetime dahil edilmeyen parametrelerden kaynaklanmaktadır. Bu parametrelerin benzetime dahil edilmesi mümkündür, ancak bu durumda hazırlanan model oldukça karmaşık hale gelecektir.

Çalışma şartları göz önüne alındığında, sistemin düşük frekanslardaki tepkisinin iyileştirilmesi beklenmektedir. Bu durumda hazırlanan benzetimin iyileştirme çalışmalarında kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] "MATLAB® User's Guide", Version 2, The Mathworks Inc., 1993
- [2] "MATLAB®/SIMULINK Dynamic System Simulation Software, User's Guide", Version 2, The Mathworks Inc., 1993
- [3] Ercan Y., "Akışkan Gücü Kontrolü Teorisi", Gazi Üniversitesi, Ankara, 1995

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkıda bulunan Proje Yöneticisi Sn. Faruk MENGÜÇ'e, Proje Teknik Yöneticisi Sn. Bülent Mete'ye ve ASELSAN A.Ş. Proje Ekibi'ne teşekkür ederiz.

ÖZGEÇMİŞLER

M. Burak GÜRCAN

1971 yılında Isparta'da doğdu. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1993 yılında "Lisans", 1997 yılında da "Yüksek Lisans" derecelerini aldı. Nisan 1999 tarihinde ASELSAN A.Ş. MST Grubu Mekanik Tasarım Müdürlüğü'nde çalışmaya başladı ve Kaideye Monteli Stinger ve Silah Sistemleri İçin Atış Kontrol Sistemi Geliştirme Projeleri'nde görev aldı. Tank İçin Atış Kontrol Sistemi Geliştirme Projesi'nde Araç İş Paketi PKD Yöneticisi'dir. Halen MST Grubu Mekanik Tasarım Müdürlüğü, Silah Sistemleri ve Elektro Optik Platform Entegrasyonu Uzmanlık Birimi'nde Baş Mühendis olarak görev yapmaktadır.

İlhan BAŞÇUHADAR

1964 yılında Ankara'da doğdu. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1986 yılında "Lisans", 1989 yılında da "Yüksek Lisans" derecelerini aldı. 1985 yılında ASELSAN A.Ş. Mekanik Tasarım Müdürlüğü'nde Geçici Teknik Eleman olarak göreve başladı ve robot kollar, adım motor kontrolü ve uygulamaları konularında çalışmalar yaptı. 1986-1993 yılları arasında 9600 VHF/FM Frekans Atlamalı Telsiz Ailesi Projesi'nde Mekanik Tasarım Mühendisi olarak çalıştı. 1993 yılından itibaren Kaideye Monteli Stinger Projesi'nde Taret Mekaniği ve Servo Sistemi PKD Yöneticiliği görevini sürdürmektedir. 1999 yılından itibaren de Tank İçin Atış Kontrol Sistemi Geliştirme Projesi'nde Servo Sistemi PKD Yöneticisi'dir. Halen MST Grubu Mekanik Tasarım Müdürlüğü, Silah Sistemleri ve Elektro Optik Platform Entegrasyonu Uzmanlık Birimi'nde Teknik Lider olarak görev yapmaktadır.

Tuna BALKAN

1957 yılında Manisa'da doğdu. Halen çalışmakta olduğu Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1979 yılında "Lisans", 1983 yılında "Yüksek Lisans", 1988 yılında da "Doktora" derecelerini aldı. 1985 yılında "Öğretim Görevlisi", 1988 yılında "Yardımcı Doçent", 1990 yılında "Doçent" ve 2000 yılında da "Profesör" ünvanını aldı. 1998 yılından beri ODTÜ Bilgisayar Destekli Tasarım İmalat ve Robotik Merkezi Başkan Yardımcılığı görevini yürütmekte ve ASELSAN A.Ş. Mekanik Tasarım Müdürlüğü'nde danışman olarak görev yapmaktadır. Çalışmaları sistem dinamiği, kontrol, sistem modellemesi, simülasyonu ve tanınması, akışkan gücü kontrolü, robotik ve uygulamaları alanlarında yoğunlaşmıştır.