

# TOZ ENJEKSİYON KALIPLAMA MAKİNALARINDA ENJEKSİYON HIZI KONTROLÜNÜN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

**İlhami YİĞİT ve Yücel ERCAN \***

Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, YOZGAT

\*Mühendislik Fakültesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, ANKARA

[ilhami.yigit@bozok.edu.tr](mailto:ilhami.yigit@bozok.edu.tr)

( Geliş/Received: 22.04.2010; Kabul/Accepted: 28.01.2011 )

## ÖZET

Bu çalışmada, bilgisayar kontrollü, elektrohidrolik servovalf ile kumanda edilen toz enjeksiyon kalıplama makinaları için ayrıntılı bir sistem modeli geliştirilmiş, enjeksiyon hızının kontrolü teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Enjeksiyon hızının yüksek doğrulukta kontrolünün toz enjeksiyon kalıplama tekniği ile üretilen metal veya seramik parçaların kalitesinde çok etkisi olduğu bilinmektedir. Bu amaçla, bu alanda önceden yapılmış çalışmaların üstünlük ve eksiklikleri incelenmiş, sistemin dinamik davranışını en çok etkileyen parametreler simülasyon çalışmaları ile belirlenmiş, elde edilen veriler ışığında kapalı çevrim kontrol sistemi tasarlanmıştır. Yapılan teorik çalışmaların doğrulanması amacıyla bir toz enjeksiyon kalıplama deney düzeneği tasarlanmış, imal edilmiş ve bilgisayar ile kontrolü yapılmıştır. Sistemin enjeksiyon hızının kontrolü yüksek doğrulukta gerçekleştirilmiştir. Teorik ve deneysel olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmış ve bulgular tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Toz enjeksiyon kalıplama, enjeksiyon hızı kontrolü, elektrohidrolik kontrol, modelleme, simülasyon

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INJECTION SPEED CONTROL IN POWDER INJECTION MOLDING MACHINES

### ABSTRACT

In this study, the injection speed control of computer controlled powder injection molding machines, driven by electro-hydraulic servovalves, was investigated both theoretically and experimentally. It is known that controlling the injection speed affects highly the quality of powder metal or ceramic parts produced by powder injection molding technique. For this purpose, first, the advantages and disadvantages of the studies carried out in this field were investigated. Then, a detailed system model of a powder injection molding machine was developed and the parameters affecting mostly the system behaviour was determined by carrying out theoretical simulation studies. In the light of obtained data, a closed loop control system was designed and manufactured, an accurate control of the machine were realized. Comparisons were made between theoretical and experimental results, and the findings are discussed.

**Keywords :** powder injection molding, injection speed control, electrohydraulic control, modeling, simulation

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enjeksiyon kalıplama, çeşitli plastik parçaların üretiminde yoğun olarak kullanılan bir üretim işlemidir. Toz enjeksiyon kalıplama, özellikle konvansiyonel yöntemler kullanılarak üretilmeyen metal veya metal olmayan parçaların üretiminde

kullanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama iki ana kısma ayrılabilir: doldurma ve sıkıştırma aşaması. Doldurma aşamasında, besleme stoğu boş kalıp içerisine doldurulur; bu işleme kalıp tamamen dolana kadar devam edilir. Bu aşamada enjeksiyon hızı ( kalıp içerisine giren debi ) kontrol edilir. Kalıp içi boşluğun dolması ile birlikte geçiş aşamasının ardından

sıkıştırma aşaması başlar. Bu aşamada, kalıp içerisindeki basınç kontrol edilir.

Kaliteli parça üretimini gerçekleştirebilmek için, kullanılacak enjeksiyon kalıplama makinasının, enjeksiyon aşaması için kapalı çevrimli bir hız kontrol sistemine, geçiş ve sıkıştırma aşaması için ise kapalı çevrimli bir basınç kontrol sistemine sahip olması gerekmektedir. İstenilen hız ve basınç profilleri kolayca verilebilmeli, karmaşık kontrol stratejileri uygulanabilmeli ve makina bilgisayar kontrollü olmalıdır [1].

Enjeksiyon kalıplama işleminin ve makinasının modellenmesi konusunda dikkati çeken ve birçok kaynak tarafından da referans olarak gösterilen ilk kapsamlı çalışma SHANKAR, A. ve PAUL, F. W. [2] tarafından yapılmıştır. Çalışma, hem teorik hem de deneyseldir. Bu alanda durum değişkenleri metodu ile yapılan ilk modelledir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan, kümesel parametrelili, deterministik, yedinci mertebeden bir sistem modeli geliştirilmiştir. SANSCHAGRIN, B.[3], sistem tanımlama metodu kullanarak deneye dayalı bir tasarım yolu izlemiştir. Çalışmada, konvansiyonel enjeksiyon kalıplama işlemini etkileyen en önemli parametreler tartışılmıştır. Enjeksiyon hızı kontrolü için oransal kontrol (P), kalıp içi basıncı kontrolü için ise oransal + integral kontrol (PI) önerilmiştir. KAMAL, M.R. vd.[4,5], mikroişlemci kontrollü laboratuvar tipi bir enjeksiyon kalıplama makinası kullanarak enjeksiyon kalıplama dinamiğinin bazı yönlerini incelemiştir. İki tip deney gerçekleştirilmiştir: i) hidrolik silindir basıncı ve enjeksiyon basıncı davranışını belirlemek için servovalf açıklıklarında basamak değişiklikler oluşturularak yapılan deterministik deneyler, ii) yalnızca enjeksiyon basıncı davranışını belirlemek için servovalfe sanki-rastgele ikili dizi (PRBS, Pseudo-Random Binary Sequence) test sinyalleri gönderilerek yapılan deneyler. LEE, D., HENS K.F. vd [6], toz enjeksiyon kalıplama için deterministik ve doğrusal olmayan bir kümesel parametre modeli oluşturmuştur. Çalışma, Newton kuralına uymayan (non-Newtonian) bir toz metal karışımı ile yürütülmüştür. Bu çalışmada servovalf kullanılmış ve servovalf birinci mertebeden bir sistemle modellenmiştir. HENS, K.F., GERMAN R.M., LEE, D.[7] vd, toz metal parça üretimi konusunda deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, özellikle parça kalitesi ile enjeksiyon hızı, kalıp içi basıncı, karışım sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı arasındaki ilişkilerin oluşturulması ayrıntılı olarak incelenmiştir. HENS, K. F. vd.[1], deneysel ağırlıklı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, mikroişlemcili bir enjeksiyon kalıplama makinası ve data toplama kartı kullanılmış, valf dinamiği birinci mertebeden bir sistemle modellenmiş, hidrolik basınçtan yararlanarak kalıp içi basıncı tahmin edilmiştir. GASPERVICH J. R. vd [8], toz enjeksiyon kalıplama çevrimi değişkenlerinin (ergiyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı

ve hızı, vb. ) yanısıra, besleme stoğunun da (akışkan karışımı), plastik enjeksiyon kalıplama akışkanı olan polimerin davranışından çok farklı olduğunu göstermiştir. NAJMI, L.A., LEE, D.[9], farklı polimer esaslı bağlayıcılar ve farklı polimer-toz karışımı oranları kullanarak enjeksiyon kalıplama işleminin doldurma aşamasını modellemiştir. CHIU, C. vd. [10], bir enjeksiyon kalıplama makinasında doldurma işleminin durum uzayında dinamik modellenmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, doğrusal olmayan ve deterministik bir kümesel parametre modeli oluşturulmuştur. Sistemde, dört yollu, iki kademeli bir servovalf kullanılmış; fakat valf makarasının dinamiği birinci mertebeden bir sistemle modellenmiştir. Yük debisi dar geçit formülünü kullanarak basınç farkının karekökü ile orantılı alınmıştır. Ancak hidrolik basıncın pistonun tek tarafına etki ettiği varsayılmış, diğer tarafın ise valfa bağlı olmasına rağmen, atmosfer basıncında olduğu kabul edilmiştir. AKŞİT, M.F., LEE D.[11,12], deneysel ve analitik olarak çalışarak toz enjeksiyon kalıplama işleminin kümesel parametre modelini oluşturmuşlardır. Çalışma da, bu alanda bundan önce yapılmış çalışmalardaki varsayımların çoğu ortadan kaldırılmış veya geliştirilmiştir. Sistem tanımlaması metodu ile enjeksiyon hızı geçici cevabı modellenerek, güvenilir bir hidrolik basınç tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Analitik modelde kullanılan parametrelerin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Besleme stoğunun kalıp içerisine kadar karşılaştığı toplam akış direnci ayrıntılı bir şekilde bulunmuştur.

Bu çalışmanın amacı, bilgisayar kontrollü, elektrohidrolik servovalf ile kumanda edilen toz enjeksiyon kalıplama makinalarında son parça kalitesinde çok etkili olan enjeksiyon hızının yüksek doğrulukla kontrolü için ayrıntılı bir sistem modeli geliştirmek ve bunu deneysel çalışmalarla doğrulamaktır. Bunun için, bu alanda önceden yapılmış çalışmalardan farklı olarak üzerinde ayrıntılı olarak durulacak konulardan en önemlileri belirtilmiş, çalışma sonunda istenilen hedefe ulaşılmıştır.

Hidrolik tahrik pistonunun sağ ve solundaki farklı alanlardan kaynaklanan asimetrik durumun dikkate alındığı doğrusal olmayan bir hidrolik sistem modeli oluşturulmuştur. Bundan önceki çalışmalarda, tek kumanda elemanı olan servovalf ya birinci mertebeden ya da ikinci mertebeden sistem olarak modellenmiş, ancak hidrolik pistonun farklı alanlarından dolayı oluşan asimetrik durum dikkate alınarak modele katılmamıştır.

Kalıp içi basıncı yerine enjeksiyon basıncı ölçülüp geribeslenmiştir. Kalıp içi basıncının ölçülebilmesi parça geometrisinden dolayı bazı durumlarda mümkün olamamakta veya karışımın kalıbın iç duvarlarında katılaşmaya başlamasından dolayı gerçek değerden daha düşük değerler ölçülmektedir [10]. Bu nedenle bir çok çalışmada, kalıp içi

basıncının kestirimi yoluna gidilmiştir [11,12,3, 4,5,10].

Enjeksiyon hızı ( kalıp içerisine giren debi ) yerine pistonun konumu ölçülüp geribeslenmiştir. Sistemin enjeksiyon hızı kontrolü için enjeksiyon debisinin proses sırasında sürekli ve hassas bir şekilde ölçülebilmesi mümkün değildir. Çünkü, nozul civarına bir debi ölçer yerleştirilmesi güç olup, standart bir debi ölçerle yoğun ve aşındırıcı bir akışkan olan besleme stoğunun debisinin yüksek doğrulukta ölçülmesi mümkün değildir. Enjeksiyon aşamasında enjeksiyon basıncı, basınç kontrol aşamasındakine göre çok çok küçük olduğundan karışımın sızıntısı ve sıkıştırılabilirliğinden dolayı meydana gelebilecek debi kaybı kalıba giren debi yanında ihmal edilerek, kalıba giren debi, vida alanı ile vida hızını çarparak elde edilebilir. Böylece debi ölçmek yerine vida hızıyla aynı olan hidrolik pistonun hızını ölçüp geri beslemek daha pratik görülmektedir. Bu durumda pistonun konumunu yüksek doğrulukta ölçüp geribesleyerek pistonun konum ve hız kontrolünü yüksek doğrulukla yapmak, yani enjeksiyon hızını dolaylı olarak kontrol etmek en uygun çözümdür.

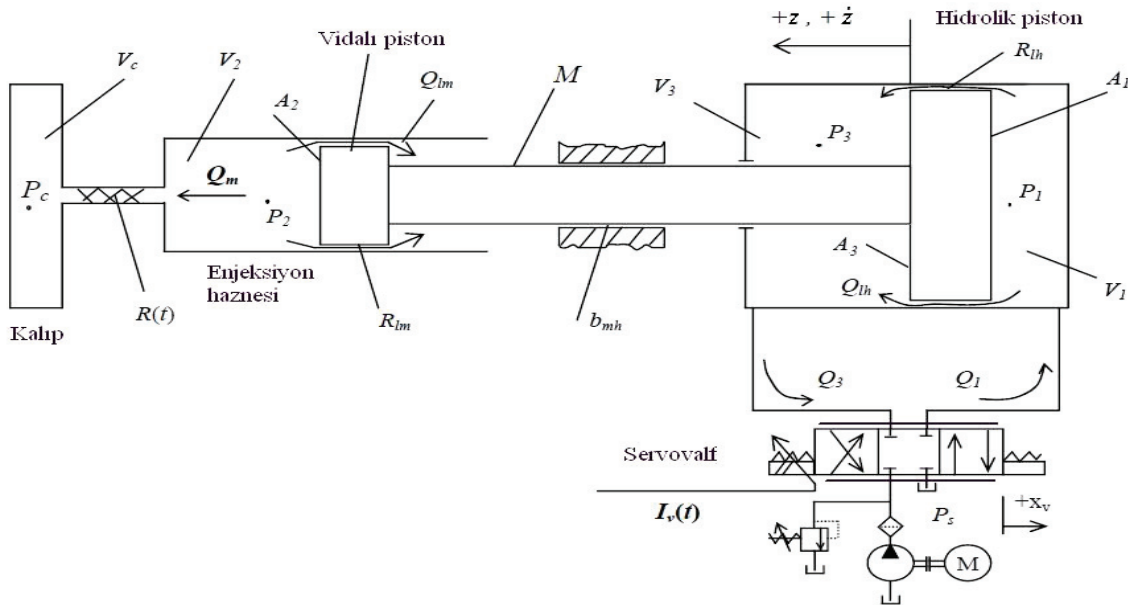
Hidrolik silindir ve enjeksiyon haznesi hacimlerinin pistonun konumu ile değişimi, bu değişimin dinamik davranışa etkileri dikkate alınmıştır. Bundan önceki bir çok çalışmada hidrolik pistonun her iki tarafındaki hacimler ve/veya enjeksiyon haznesi hacminin pistonun konumu ile değiştiği dikkate alınmamıştır. Halbuki bu hacimlerin değişken olması, hidrolik yağ ve besleme stoğunun sıkıştırılabilirliğinden kaynaklanan dinamik etkilerin de işlem sırasında doğrusal olmamasına neden olmaktadır.

Deterministik kümesel parametre modeli istatistiki yöntemlere tercih edilmiştir. Çünkü, toz enjeksiyon kalıplama konusunda yapılacak istatistiki kontrol çalışmasında daha kapasiteli bir bilgisayar ve daha kapsamlı bir yazılım gerekeceği gibi, örnekleme zamanı da artacaktır. Ayrıca, makinarya test sinyalleri gönderilerek proses sırasında sistem tanımlaması yoluyla sistem parametrelerinin sürekli olarak yenilenmesi, ani debi ve basınç değişimlerinin olduğu bir sistemde yüksek doğrulukta başarılamayacaktır.

## 2. SİSTEMİN MODELLENMESİ (MODELING OF THE SYSTEM)

Toz enjeksiyon kalıplama makinasının fiziksel modeli Şekil 1 'de görülmektedir. Hidrolik piston ve vida tek parça halinde hareket etmekte olduklarından, tek toplam kütle ( $M$ ) olarak modele katılmıştır. Hidrolik kısımdaki ve enjeksiyon silindirindeki viskoz sürtünmeler, tek kütle hızı söz konusu olduğundan, bir eşdeğer sönüm sabiti ( $b_{mh}$ ) ile modellenmiştir. Enjeksiyon kısmındaki viskoz sürtünme, besleme stoğuna, akış kesme hızına ve sıcaklığa bağlıdır. Pistonun hızının bir fonksiyonu olarak belirlenen eşdeğer sönüm sabiti, zamanla değişen ve doğrusal olmayan bir etkidir.

Hidrolik yağın silindir ile piston arasından sızıntısı besleme stoğunun enjeksiyon silindiri ile vida ucundaki çekvalf arasından sızıntısı bir akışkan direnci olarak modellenmiştir. Bu etkiler, sızdırmazlıkla ilgili yeterli önlem alındığında ihmal edilebilir. Karışımın enjeksiyon nozulu ve kalıp içerisinden akışı ise, değişken bir akışkan direnç,  $R(t)$ , ile modele katılmıştır.  $R(t)$  karışımın cinsine, parçanın geometrisine ve yolluklara göre değişkenlik gösterir.



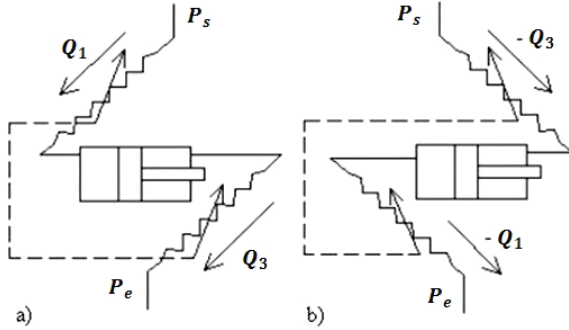
Şekil 1. Toz enjeksiyon kalıplama makinasının modeli ( Model of the powder injection molding machine )

Hidrolik pistonun sağ ve sol tarafındaki hacimler ve enjeksiyon haznesi hacmi pistonun konumu ile sürekli değişmekte olduğundan, hidrolik yağ ve karışımın sıkıştırılabilirliği doğrusal olmayan sistem parametresi olarak modele katılmıştır.

Çalışmada kullanılan servovalf, iki kademeli olup, birinci kademesi kanat-nozul türünde, ikinci kademesi ise kapalı merkezli makaralı türdendir. İki kademe arasında geribesleme yoktur. Servovalfi imal eden firma servovalfin birinci ya da ikinci mertebeli sistemlerle modellenebileceğini belirtmektedir. Burada, sistemin yüksek hızlarla ve kazançlarla çalışacağı dikkate alınarak, servovalfe sağlanan giriş akımı ile makaranın konumu arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ikinci mertebeden alınmıştır.

$$\ddot{x}_v + (2\xi_v \omega_v) \dot{x}_v + (\omega_v^2) x_v = (\omega_v^2 K_v) I_v(t) \quad (1)$$

Çalışmada kullanılan servovalf, 4-yollu, kapalı merkezli makaralı türden olduğundan, herhangi bir çalışma durumunda orifislerden sadece ikisi açık olup, Şekil 1 esas alınarak, makaranın konumuna göre Şekil 2 'de görülen seri devrelerden birisi elde edilir [13]. Hidrolik pistonun sağ ve sol tarafındaki alanların farklı olmasından dolayı, valf kapılarında geçen debiler de farklı olur ve aşağıdaki ifadelerle tanımlanabilir:



Şekil 2. Kapalı merkezli dört yollu valfin akış devresi  
(The flow circuits of a closed centred, 4-way servovalve)

Eğer  $x_v \geq 0$  ise;

$$Q_1 = K_Q x_v \sqrt{(P_s - P_1)/\rho_h} \quad (2)$$

$$Q_3 = K_Q x_v \sqrt{P_3/\rho_h} \quad (3)$$

Eğer  $x_v < 0$  ise;

$$Q_1 = K_Q x_v \sqrt{P_1/\rho_h} \quad (4)$$

$$Q_3 = K_Q x_v \sqrt{(P_s - P_3)/\rho_h} \quad (5)$$

Servovalften hidrolik silindire giren  $Q_1$  debisinin sızıntıya giden kısmı  $Q_{lh}$ , dar ve uzun bir sızıntı hattı üzerinden olduğundan, pistonun her iki tarafındaki  $P_1$  ve  $P_3$  basınçlarının farkı ile doğru orantılı olup pistonun sağ tarafındaki basıncın dinamiği aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\beta_h}{V_1} [Q_1 - C_{lh}(P_1 - P_3) - A_1 \dot{z}] \quad (6)$$

Benzer şekilde, hidrolik silindirin sol tarafındaki hidrolik basıncın zamanla değişimi için aşağıdaki ifade bulunabilir.

$$\frac{dP_3}{dt} = \frac{\beta_h}{V_3} [-Q_3 - C_{lh}(P_1 - P_3) + A_3 \dot{z}] \quad (7)$$

Vida ve pistonun kütesine ( $M$ ) etkiyen sürtünme ve basınç kuvvetleri dikkate alınarak, Newton' un ikinci kanunu yazılırsa, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\ddot{z} = \left(\frac{-b_{mh}}{M}\right) \dot{z} + \left(\frac{-A_2}{M}\right) P_2 + \left(\frac{A_1}{M}\right) P_1 + \left(\frac{-A_3}{M}\right) P_3 \quad (8)$$

Doldurma aşamasında kalıp içerisine giren debi (yani enjeksiyon hızı) ise, kalıp içinde bulunan havanın basıncının daima atmosfer basıncında olduğunu kabul ederek, kalıp ve nozulun akışkan direnci  $R(t)$  cinsinden enjeksiyon basıncının zamana göre değişim hızı için aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{\beta_m}{V_2} \left[ A_2 \dot{z} - C_{lm} P_2 - \frac{1}{R(t)} P_2 \right] \quad (9)$$

Sonuç olarak, kontrol edilen sistemin durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [14].

$$\dot{x}_v = v_v \quad (10)$$

$$\dot{v}_v = -(\omega_v^2) x_v - (2\xi_v \omega_v) v_v + (\omega_v^2 K_v) I_v(t) \quad (11)$$

$$\dot{P}_1 = \begin{cases} \frac{\beta_h}{V_1} \left[ K_Q x_v \sqrt{\frac{P_s - P_1}{\rho_h}} - C_{lh}(P_1 - P_3) - A_1 v \right] & ; x_v \geq 0 \\ \frac{\beta_h}{V_1} \left[ K_Q x_v \sqrt{\frac{P_1}{\rho_h}} - C_{lh}(P_1 - P_3) - A_1 v \right] & ; x_v < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\dot{P}_3 = \begin{cases} \frac{\beta_h}{V_3} \left[ -K_Q x_v \sqrt{\frac{P_3}{\rho_h}} + C_{lh}(P_1 - P_3) + A_3 v \right] & ; x_v \geq 0 \\ \frac{\beta_h}{V_3} \left[ -K_Q x_v \sqrt{\frac{P_s - P_3}{\rho_h}} + C_{lh}(P_1 - P_3) + A_3 v \right] & ; x_v < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\dot{z} = v \quad (14)$$

$$\dot{v} = \left(\frac{-b_{mh}}{M}\right) v + \left(\frac{-A_2}{M}\right) P_2 + \left(\frac{A_1}{M}\right) P_1 + \left(\frac{-A_3}{M}\right) P_3 \quad (15)$$

$$\dot{P}_2 = \frac{\beta_m}{v_2} \left[ A_2 v - C_{lm} P_2 - \frac{1}{R(t)} P_2 \right] \quad (16)$$

$$\dot{V}_m = \frac{1}{R(t)} P_2 \quad (17)$$

Burada, sistemin kontrol girişi servovalfe giriş akımı  $I(t)$  'dir. Önceden de bahsedildiği gibi enjeksiyon hızı ( kalıp içerisine giren debi ) yerine pistonun konumu ölçülüp geribeslenmiş,  $Z_{ref}(t)$  referans sinyali  $Q_{mref}(t)$  referans enjeksiyon hızından türetilmiştir.

### 3. BİLGİSAYAR SİMÜLASYONLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR (COMPUTER SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL STUDIES)

#### 3.1. Bilgisayar Simülasyonları ( Computer Simulations )

Kontrol edilecek olan sistemin ve kapalı çevrim kontrol sisteminin dinamik davranışlarını incelemek amacıyla bir sayısal simülasyon programı yazılmıştır [14]. Şekillerde,  $Q_{mref}$  referans debi değerini vida kesit alanına bölüp integralini alarak elde edilen  $Z_{ref}$  referans konumu da verilmiştir. Ayrıca, enjeksiyon hızı basamak cevabında konum bilgisi rampa şeklinde olup dinamik hata sıfırdan farklı olmasına rağmen, rampanın eğimi enjeksiyon hızının elde edilen değerini vermektedir ve enjeksiyon hızı hatasının durağan değeri sıfırdır. Dolayısıyla, burada

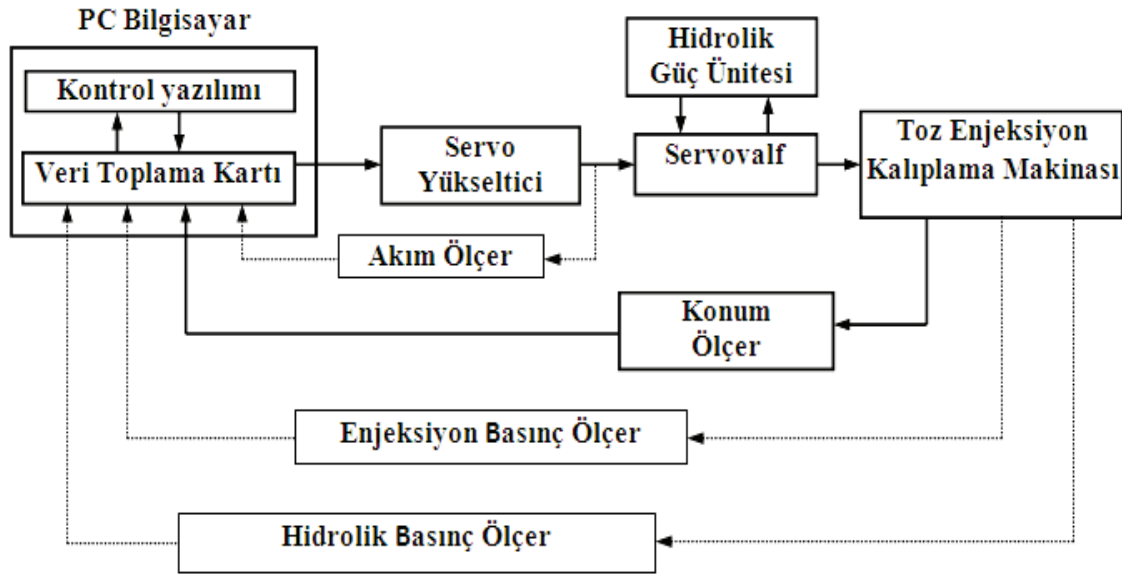
konumdaki hatadan çok ölçülen konum bilgisinin zaman boyunca eğimine bakılmalıdır.

#### 3.2. Deneysel çalışmalar ( Experimental studies)

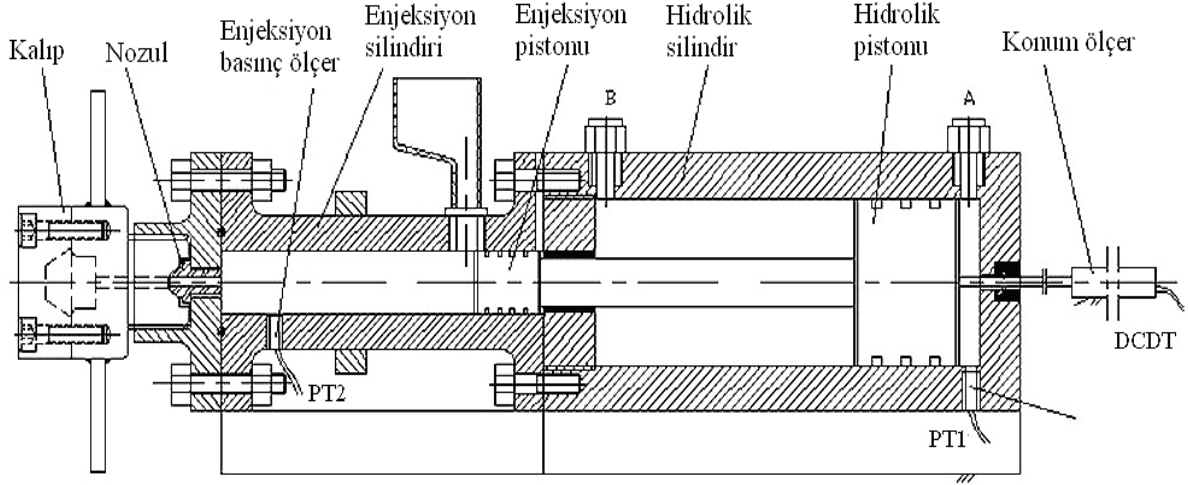
Deneysel çalışmalar özel olarak tasarlanmış deney düzeneği üzerinde yapılmıştır [14] ( Şekil 3 ve 4 ). Sistem iki kademeli kapalı merkezli bir servovalf ile tahrik edilen farklı alanlı bir basınç artırıcı hidrolik piston silindir mekanizmasına sahiptir. Hidrolik piston ile enjeksiyon pistonu birbirine rijit olarak bağlı olup, piston alanları oranı 6,152 'dir. Deneysel 60 l/dakikalık basınç kompanzasyonlu pompa ile sağlanan 175 bar besleme basıncı ile gerçekleştirilmiştir. Böylece 1076,6 barlık bir maksimum enjeksiyon basıncına ulaşılmıştır.

Çalışmada, toz enjeksiyon kalıplama besleme stoklarının reolojik özelliklerine çok benzer özellikler taşıyan bentonit artı su karışımı kullanılmıştır. Karışımın reolojik özellikleri özel olarak imal edilmiş kılcal reometre ile belirlenmiştir.

Deneysel 80486-DX2-66 MHz'lik işlemciye sahip bir PC bilgisayar kullanılmıştır. Bilgisayara KEITHLEY firmasının MetraByte marka, DAS20 model veri toplama kartı takılmış, çıkan sinyal servoyükseltici ile akım sinyaline dönüştürülmüştür. Deneysel düzeneğine ait tüm parametre değerleri [ 15 ] 'de verilmiştir.



Şekil 3. Toz enjeksiyon kalıplama deney düzeneğinin blok diyagramı  
( Block diagram of the powder injection molding setup )

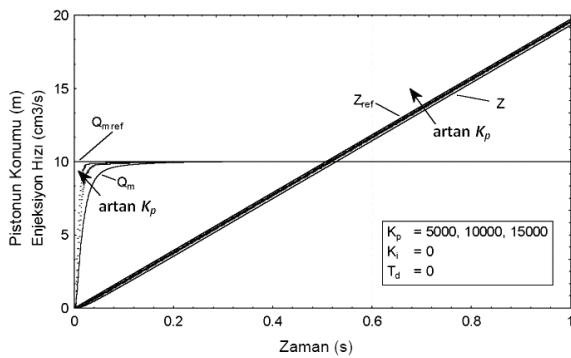


Şekil 4. Toz enjeksiyon kalıplama deney düzeneği ( The injection molding setup )

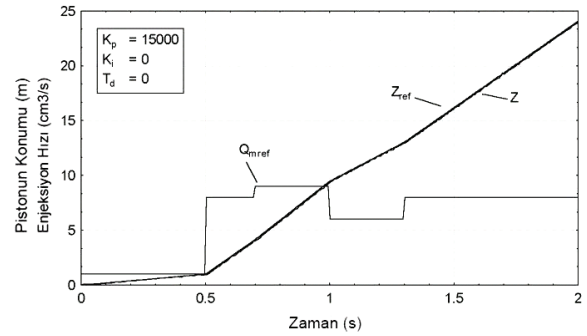
### 3.2. Simülasyon ve Deneysel Sonuçlarının

#### Karşılaştırılması (Comparison of Simulation and Experimental Results)

Sistemin enjeksiyon hızı referans basamak girişine cevap eğrilerini elde edebilmek ve kontrol organı katsayılarını belirleyebilmek amacıyla  $Q_{mref} = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $K_p = 1000-17000$  için simülasyonlar yapılmıştır. Böylelikle elde edilen sistemin basamak cevapları,  $K_p = 5000, 10000$  ve  $15000$  için, Şekil 5 'de, deneysel olarak sistemin bir referans enjeksiyon hızı dosyasından okuduğu basamak girişleri dizesine cevabı ise Şekil 6 'da görülmektedir. Yalnızca oransal kontrol kullanılması ve oransal kazanç  $K_p$  'nin değerinin  $15000$  seçilmesinin yeterli olduğu görülmüştür. Daha yüksek  $K_p$  değerlerinin sonucu fazla etkilemediği görülmüştür.



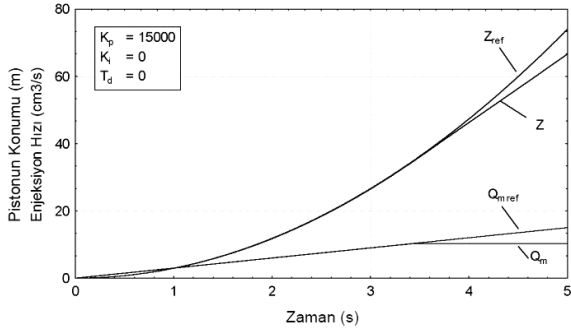
Şekil 5. Sistemin enjeksiyon hızı basamak cevapları ( Simülasyon ) ( The responses to a step reference injection speed ) ( Simulation )



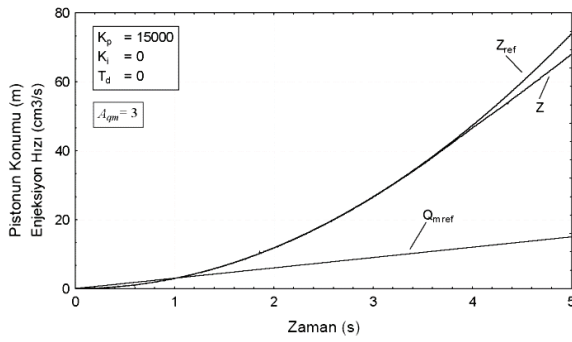
Şekil 6. Sistemin enjeksiyon hızı basamak girişleri dizesine cevabı ( Deneysel ) ( Response to a reference injection speed profile ) ( Experimental )

Teorik çalışmalar, enjeksiyon hızı basamak cevabında hatanın durağan değerinin sıfır, zaman sabitinin  $13 \text{ ms}$  ve  $Q_{mref} = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$  and  $K_p \cong 15000$  için piston konumundaki hatanın  $0,1 \text{ mm}$  'den az olduğunu göstermiştir. Bu parametrelerin deneysel olarak elde edilen değerleri her biri anıldığı sıraya göre, sıfır,  $12 \text{ ms}$  ve  $0,08 \text{ mm}$  'dir.

Simülasyonlar ve deneysel çalışmalarda sistemin enjeksiyon hızı rampa referans girişlerine cevapları değişik eğimli rampalar ( $Q_{mref} = A_{Qm} t = 1 t \text{ cm}^3/\text{s}$  'den  $Q_{mref} = 5 t \text{ cm}^3/\text{s}$  'ye kadar) ve farklı  $K_p$  değerleri için elde edilmiş,  $Q_{mref} = 3 t \text{ cm}^3/\text{s}$  için cevap eğrisi Şekil 7 ve Şekil 8 'de örnek olarak verilmiştir.



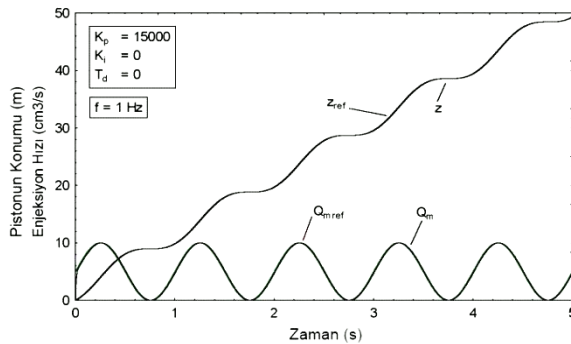
**Şekil 7.** Sistemin enjeksiyon hızı rampa referans girişine cevabı ( Simülasyon ) ( The responses to a ramp reference injection speed ) ( Simulation )



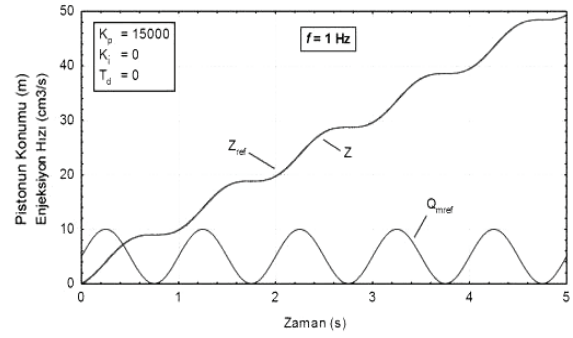
**Şekil 8.** Sistemin enjeksiyon hızı rampa referans girişine cevabı ( Deneysel ) ( Response to ramp reference injection speed ) ( Experimental )

Teorik ve deneysel olarak  $Q_{mref} = 3 t \text{ cm}^3/\text{s}$  için elde edilen enjeksiyon hızı rampa cevap eğrilerinin birbirlerine çok benzer olduğu ( sıfıra yakın dinamik hata ) görülmüştür.

Sistemin enjeksiyon hızı sinüs cevapları,  $Q_{mref} = Q_{m0} + Q_{mg} \sin[2(\pi f) t]$  fonksiyonunun değişik  $Q_{m0}$  ve  $Q_{mg}$  ve  $f$  değerleri için elde edilmiştir. Sistemin  $Q_{m0} = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_{mg} = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $f = 1 \text{ Hz}$  olan sinüsoidal girişe  $K_p = 15000$  için cevap eğrileri ( simülasyon ve deneysel ) Şekil 9 ve 10 'da örnek olarak verilmiştir.



**Şekil 9.** Sistemin enjeksiyon hızı sinüs referans girişine cevabı ( Simülasyon ) ( The responses to a sinusoidal reference injection speed ) ( Simulation )



**Şekil 10.** Sistemin enjeksiyon hızı sinüs referans girişine cevabı ( Deneysel ) ( Response to a sinusoidal reference injection speed ) ( Experimental )

Sinüs girişler için deneysel olarak elde edilmiş cevap eğrilerine bakıldığında, yaklaşık 5 Hz frekansa kadar genlik düşüşü olmaksızın ihmal edilecek düzeyde faz kayması ile, simülasyon çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile tutarlılık gösterdiği, sistemin izleme kabiliyetinin çok iyi olduğu, enjeksiyon hızı kontrolünün istenilen düzeyde başarılı olduğu görülmektedir.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada toz enjeksiyon kalıplama makinasının ayrıntılı bir modeli oluşturulmuştur. Simülasyon çalışmaları bilgisayar kontrollü elektrohidrolik tahrikli toz enjeksiyon kalıplama makinası deney düzeneğine ait parametreler kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonlardan elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla standart test girişleri olan basamak, rampa ve sinüs referans enjeksiyon hızı profilleri de kullanılarak çok sayıda deney gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, basamak girişlere cevaplarda 0,08 mm 'den az kalıcı hata, rampa girişlere cevaplarda  $A_{Qm} \leq 3$  için sıfıra yakın dinamik hata, sinüs girişlerde 5 Hz 'e kadar genlik düşüşü olmaksızın ihmal edilecek düzeyde faz kayması gözlenmiştir. Böylece, teorik ve deneysel olarak elde edilen cevap eğrileri, tasarlanan kontrol sistemi ile enjeksiyon hızının yüksek doğrulukta kontrol edilebileceğini, enjeksiyon hızı kontrolü için oransal kontrolün tatmin edici sonuçlar verdiğini, sistemin referans girişleri istenilen düzeyde takip ettiğini göstermiştir. Bu çalışma ile, toz enjeksiyon kalıplama makinasının kontrolü için karmaşık kontrol stratejilerinin izlenmesine gerek olmadığı, enjeksiyon hızı kontrolünde oransal kontrolün yeterli sonuçlar verdiği, geniş bir toplam akışkan direnci aralığında, özellikle servovalf karakteristiğinin ve diğer doğrusal olmayan etkilerin iyi dikkate alınması ile kaliteli bir kontrolün gerçekleştirilebileceği ve geliştirilen modelin doğruluğunu ortaya koymuştur.

**SİMGELER (SYMBOLS)**

$x_v, v_v$	valf makarasının konumu (m) ve hızı (m/s)
$I_v$	servovalfe giriş akımı, mA
$K_v$	servovalfin birinci kademe kazancı, m/mA
$\omega_v$	servovalfin doğal frekansı, rad s <sup>-1</sup>
$\xi_v$	servovalfin birinci kademe sönüm oranı
$K_Q$	orifis geometrisi ve boşaltma katsayısını içeren katsayı ( $K_Q = C_d w \sqrt{2}$ )
$C_d$	servovalf orifislerinin boşaltma katsayıları
$w$	servovalf portunun çevresel uzunluğu, m
$\rho_h$	hidrolik yağın yoğunluğu, kg m s <sup>-1</sup>
$\beta_h$	hidrolik yağın Bulk modülü, Pa
$\beta_m$	besleme stoğunun Bulk modülü, Pa
$P_s$	hidrolik kaynak basıncı, Pa
$P_1, P_3$	hidrolik silindirin ileri ve geri hareket tarafındaki basınçlar, Pa
$P_2$	enjeksiyon basıncı, Pa
$V_1, V_3$	hidrolik silindirin ileri ve geri basınç tarafındaki akışkan hacimleri, m <sup>3</sup>
$V_2$	vida önündeki karışımın hacmi, m <sup>3</sup>
$V_m$	kalıba giren besleme stoğu hacmi, m <sup>3</sup>
$A_1, A_3$	hidrolik pistonun ileri ve geri basınç tarafındaki alanlar, m <sup>2</sup>
$z, v$	hidrolik pistonun konumu (m) ve hızı (m/s)
$C_{lh}$	hidrolik silindir-piston arası sızıntı katsayısı
$C_{lm}$	enjeksiyon haznesi ile piston arası sızıntı katsayısı
$R(t)$	besleme stoğu akışına karşı değişken direnç

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Hens, K. F. Lee D. and German, M., "Processing Conditions and Tooling for Powder Injection Molding", **APMI**, 27(2), 141-153, 1991.
- Shankar, A. ve Paul, F. W., "A Mathematical Model for the Evaluation of Injection Molding Machine Control", **J.of Dyn. Sys. Meas. and Control**, 104, 86-92, 1982.
- Sanschagrin, B., "Process Control of Injection Molding", **Polymer Engineering and Science**, 23(8), 431-438, 1983.
- Kamal, M.R., Patterson, W.I., Fara, D.A. and Haber, A., "A study in Injection Molding Dynamics", **Polymer Engineering and Science**, 24(9), 686-691, 1984.
- Fara, D.A., Kamal, M. R. and Patterson, W.I., "Evaluation of Simple Dynamic Models and Controllers for Hydraulic and Nozzle Pressure in Injection Molding", **Polymer Engineering and Science**, 25 (11), 714-723, 1985.
- Hens K. F., D. Lee, S. T. Lin ve R. M. German, 1988, "Modeling and Testing of Powder Injection Molding Process", **Modern Developments in PM, APMI**, 18, 417-429, 1988.
- Hens, K. F., Lee, D., Lin S. T. and German, R. M., "Integrity of Complex Shape Products by Powder Injection Molding", **PMI**, 23(1), 15-21, 1991.
- Gaspervich, J. R., "Practical Application of Flow Analysis in Metal Inj. Molding", **APMI**, 27(2), p. 133-139, 1991.
- L. A. Najmi ve D. Lee, "Modeling of the Mold Filling Process for Powder Injection Molding", **Polymer Engineering and Science**, 31(15), 1137-1148, 1991.
- Chiu C.P., Shih M.C. ve Wei J.H., "Dynamic Modeling of the Mold Filling Process in an Injection Molding Machine", **Polymer Engineering and Science**, 31(19), 1417-1425, 1991.
- Aksit, M.F. ve Lee, D., "A Lumped parameter Analysis of Powder Injection Molding", **The Int. J. of Powder Metallurgy**, 31(4), 351-363, 1995.
- Aksit, M. F., 1993, **A Lumped Parameter Analysis of Powder Injection Molding**, Master Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 1993.
- Ercan, Y., **Akışkan Gücü Kontrolü Teorisi**, Gazi Üniv. Yayın No: 206, 1995.
- Yiğit, İ., Toz Enjeksiyon Kalıplama Makinalarında Enjeksiyon Hızı ve Kalıp İçi Basıncı Kontrolünün Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi, **Ph.D. Doktora Tezi**, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2000.
- Yiğit, İ., Ercan Y. ve Sarıtaş S., "Cavity Pressure Control of Powder Injection Molding Machines", **Transactions of The Institute Of Measurement And Control**, 393-415, Belfast, England, 2004.