

SAYISAL DENETİMLİ HİDROLİK POZİSYONLAMA SİSTEMİNİN TAGUCHI METODU İLE OPTİMİZASYONU

Ahmet Murat PINAR ve Abdulkadir GÜLLÜ*

Makine Bölümü, Turgutlu MYO, Celal Bayar Üniversitesi, 45400 Turgutlu/Manisa

* Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Ankara

ahmet.pinar@bayar.edu.tr, agullu@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 05.02.2009 ; Kabul/Accepted: 12.01.2010)

ÖZET

Bu çalışma, CNC takım tezgâhların denetiminde kullanılan FM 357 fonksiyon modülü ile kontrol edilen hidrolik sistemin pozisyonlama doğruluğunu incelemektedir. Sistem oransal yön denetim valflerinin yönlendirdiği iki adet silindirin sürdüğü iki eksen den oluşmaktadır. İlerleme oranı, hareket mesafesi, yön ve atalet yükü parametrelerinin pozisyonlama doğruluğu üzerindeki etkileri ve bunlara ait optimum seviyelerin tespiti Taguchi metodu ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre minimum pozisyonlama hatası 10 mm/dk'lık ilerleme oranında, 5 mm'lik hareket mesafesinde, "-" yönde ve 5 kg'lık atalet yükünde elde edilmiştir. Son olarak, yapılan doğrulama deneyleri, Taguchi metodunun, sistemin optimizasyonunu yeterli doğrulukta gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: CNC, sayısal denetim, Taguchi metodu, hidrolik pozisyonlama.

OPTIMIZATION OF NUMERICAL CONTROLLED HYDRAULIC DRIVEN POSITIONING SYSTEM VIA TAGUCHI METHOD

ABSTRACT

This study, investigates the positioning accuracy of the hydraulic system that is controlled by FM-357 function module used in the control of CNC machine tools. The system consists of two axes driven by two cylinders directed by proportional directional valves. The effects of feed rate, motion distance, direction and inertia load on the positioning accuracy and the determination of their optimum levels are achieved via Taguchi method. According to this, minimum positioning error is obtained in the motion distance of 5mm, in "-" direction and at the inertia load of 5kg. Lastly, the confirmation experiments showed that Taguchi method achieves the optimization of the system with sufficient accuracy.

Keywords: CNC, numerical control, Taguchi method, hydraulic positioning.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek cevap hızı, yüksek sistem rijitliği, daha yüksek kuvvet ağırlık oranı ve küçük hacim avantajlarına sahip hidrolik sistemler; modellenmesi zor olan sıcaklık, sıkıştırılabilirlik, sızıntılar, ağırlık, sürtünme vb. doğrusal olmayan parametreler sebebiyle kararlılıklarını yitirmektedirler. Hidrolik sistemlerin lineer olmayan davranışlarının telafisi için adaptif ve değişken yapı denetimi (DYD) en çok tercih edilen metotlardır.

Adaptif denetleyicilerin birçoğunda [1-5] sistem için lineerleştirilmiş model kullanılmaktadır. Bu denetle-

yiciler değişen sistem parametrelerine karşı tatminkâr olmalarına rağmen, genel kararlılık eksikliği bunlara ait en önemli dezavantajdır [6].

Klasik DYD [7-9] ise parametre değişimlerine ve dış bozucu etkilere karşı gürbüz olmasına rağmen, bünyesinde bileşen tahribatı ve yüksek kontrol aktivitesine sebep olan titreşimi barındırmaktadır. Genel olarak DYD'deki titreşim, kontrol girişi yani DYD çıkışında ve durum uzayındaki değişkenlerde olmak üzere 2'ye ayrılmakta olup, bunlar farklı özellikli ve kaynaklıdır [10]. Bununla ilgili birçok çözüm metodu olmasına karşın bu alandaki çalışmalar sınırlıdır.

katmanı [11, 12] ve erişim kuralı [13–15] yaklaşımlarına odaklanmaktadır.

Pozisyon denetiminde diğer bir teknoloji de CNC takım tezgâhlarının kontrolünde kullanılan sayısal denetimdir. Mikron hassasiyetinde işleme toleransı ve karmaşık geometrilerin işlenebilmesi CNC sistemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Bu teknoloji hidrolik sistemlerin pozisyon denetiminde çok kullanılmamaktadır. Altıntaş ve Lane [16] apkant presin hız ve konum kontrolünü açık mimari CNC sistemle gerçekleştirmiştir. Pınar ve Güllü CNC işleme merkezine benzer konfigürasyonda iki eksenenden oluşan bir hareket mekanizmasının tasarım ve imalatını gerçekleştirmişler ve sistemin pozisyonlama doğruluğunu istatistiksel olarak test etmişlerdir [17, 18].

Yapılan çalışmada [17]'deki prototip kullanılarak, doğrusal hareketlere ait optimal pozisyonlama doğruluğu Taguchi metodu ile elde edilmiştir.

2. CNC HİDROLİK SİSTEM (CNC HYDRAULIC SYSTEM)

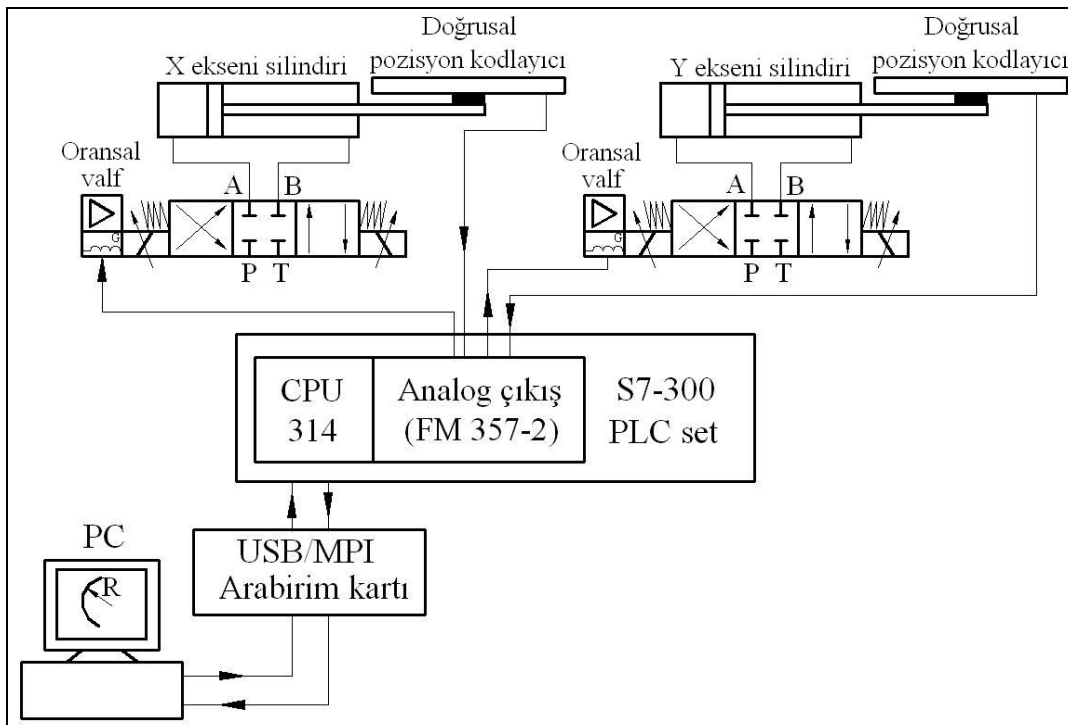
Sistem, Siemens S7-300 PLC seti bünyesindeki 4 eksen CNC denetleyici ile (FM-357) kapalı çevrim olarak kontrol edilmektedir. Geri besleme elemanı olarak 5µm'lik doğrusal pozisyon kodlayıcı kullanılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, denetleyiciye ait yazılımla istenen harekete göre ilgili komut MDI (Manuel Data Input) modunda girilmektedir. CNC komuta ait veriler USB/MPI arabirim kartı vasıtasıyla PLC (Programable Logic Controller) setin işlemcisine (CPU-314) iletilir. CNC denetleyici (FM 357-2) ±10 Volt'luk çalışma gerilimi aralığında uygun elektrik sinyalini oransal valfe uygular. Valfin yönlendirdiği

silindirler, eksenini uygun hızda hareket ettirerek istenilen hareketin gerçekleştirilmesini sağlar [19].

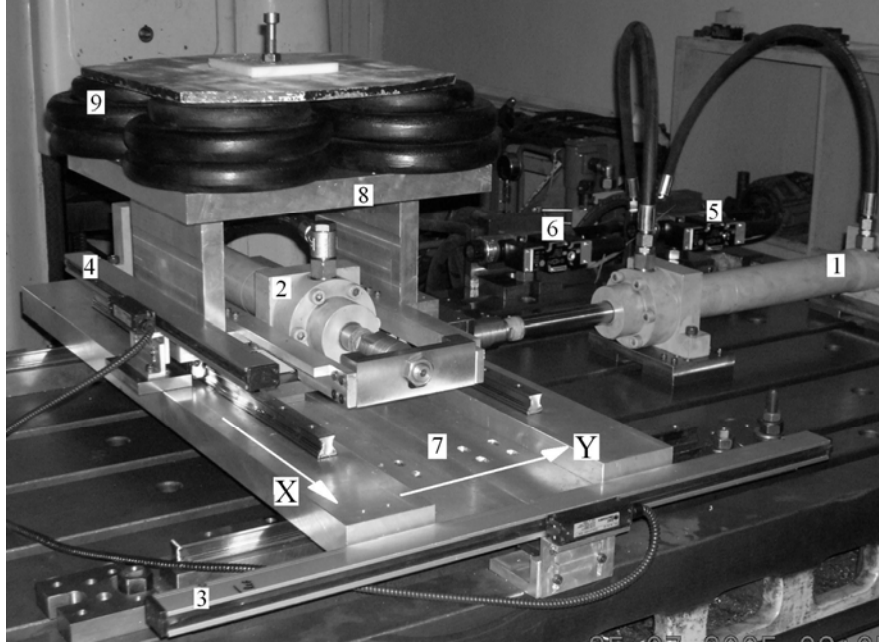
Düzenek CNC dik işleme merkezine benzer konfigürasyonda 90° konumlandırılmış X ve Y ekseninden oluşmaktadır. Mekanik yapı, CNC temel hareketleri olan doğrusal interpolasyon (G01), dairesel interpolasyon (G02, G03) ve hızlı hareketleri (G00) yapabilecek yetenekte tasarlanmıştır (Şekil 2). Her iki ekseninde de hareket iletimleri, bilyeli araba ve ray-kızak sistemi ile sağlanmıştır. Sistemde Star marka 4 adet 1605-804-31/600 sipariş kodlu 20'lik ray-kızak ve 8 adet 1622-894-10 sipariş kodlu bilyeli araba kullanılmıştır.

Şekil 3'de görüldüğü gibi, cihazda kullanılan hidrolik yapı 380 voltluk 3 faz asenkron motorun sürdüğü bir dıştan dişli pompa (Bosch Rexroth, 0510725031), 2 adet tek rodlu silindir (Bosch Rexroth CDH1 MS2 50/36/300 B1X/B1CGUTWW + GAS35), bir basınç emniyet valfi (Bosch Rexroth, DBDH 10 K1X/100), bir pilot uyarılı basınç düşürme valfi (Bosch Rexroth, DR10K4-3X/100YM), bir balonlu akümülatör (Hayboc, SB330-4A1/112U-330A), bir hassas basınç filtresi (Hayboc, DFBN/HC110G10A1.1), bir çek valf (Flutec, CP100-1-B-0-005), bir havalı soğutucu (Emmegi 2020) ve bir 4/3 oransal yön kontrol valfinden (Bosch Rexroth, WREE6E322X/G24K31/A1V) oluşmaktadır.

Deneyler X ekseninde gerçekleştirilmiş olup, Yön faktöründeki "+", silindirin rotsuz kısmından öne doğru olan hareket yönünü, "-" ise, rotlu kısımdan arkaya doğru olan hareket yönünü ifade etmektedir.



Şekil 1. Sistemin çalışma prensibi [19] (Working principle of the system)



Şekil 2. Mekanik aksam: (1) Y-ekseni silindiri, (2) X-ekseni silindiri, (3) Y-ekseni doğrusal pozisyon kodlayıcısı, (4) X-ekseni doğrusal pozisyon kodlayıcısı (5) Y-ekseni oransal valfi, (6) X-ekseni oransal valfi, (7) Y-ekseni tablası, (8) X-ekseni tablası ve (9) Ağırlıklar [19] (Mechanical structure: (1) Y-axis cylinder, (2) X-axis cylinder, (3) Y-axis linear encoder, (4) X-axis linear encoder, (5) Y-axis proportional directional valve, (6) X-axis proportional directional valve, (7) Y-axis table, (8) X-axis table and (9) Weights)

3. TAGUCHI METODU (TAGUCHI METHOD)

İlk olarak 60'lı yıllarda Genichi Taguchi tarafından önerilen metot, endüstriyel ürün kalitesinin iyileştirilmesinde ispatlanan başarısından dolayı genişçe uygulanmaktadır [20, 21]. Ek olarak, düşük deney sayısı, kontrol faktörlerinin kalite karakteristiği üzerindeki etkilerinin ve optimum faktör seviyelerinin kolaylıkla elde edilmesi metodun çekiciliğini arttırmaktadır. Aşağıda Taguchi metoduna ait uygulama adımları verilmiştir:

1. Faktör ve bunlara ait etkileşimlerin belirlenmesi
2. Her bir faktöre ait seviyelerin belirlenmesi

3. Uygun ortogonal dizinin seçilmesi
4. Seçilen ortogonal matrise faktör ve etkileşimlerin atanması
5. Deneylerin yapılması
6. Verilerin analizi
7. Faktörlerin optimal seviyelerinin belirlenmesi
8. Doğrulama deneylerinin yapılması
9. Metodun güven aralığının belirlenmesi

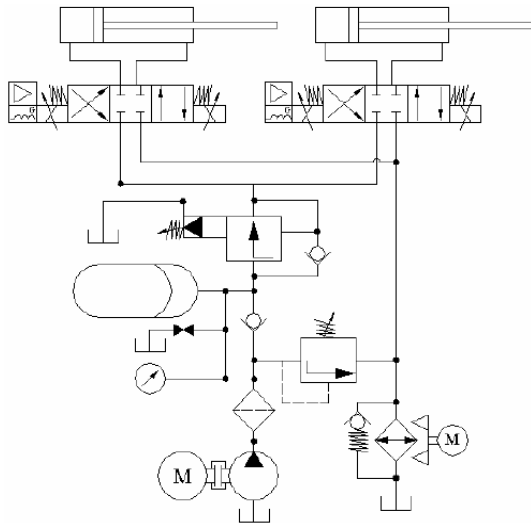
Bu çalışmada, Taguchi'ye ait 9 adımın uygulanması ile ilerleme oranının, hareket mesafesinin atalet yükü ve yön faktörlerinin pozisyonlama doğruluğu (H) üzerindeki etkileri ve bu faktörlere ait optimum seviyeler belirlenmiştir. Tablo 1'de seçilen faktörler ve seviyeleri verilmiştir.

Tablo 1. Faktörler ve seviyeleri (Factors and their levels)

Kontrol Faktörleri	Birimler	Seviyeler	
		1	2
İlerleme oranı (A)	mm/dk.	10	1000
Hareket mesafesi (B)	mm	5	20
Atalet yükü (C)	kg	5	50
Yön (D)	-	(+)	(-)

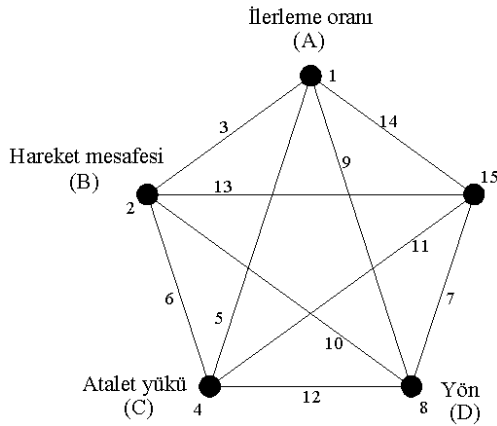
Çalışmadaki deney sayısını ve doğruluğunu direkt olarak etkileyen ortogonal dizinin seçimi faktör ve etkileşimlerin toplam serbestlik derecesine dayalı olarak belirlenmektedir. Seçilen ortogonal dizine ait serbestlik derecesi sistemin serbestlik derecesinden büyük ya da eşit olmalıdır. Eşit sayıda seviyeye sahip faktörler içeren deney sistemi için serbestlik derecesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$T_{SD} = (n_s - 1).n_f + (n_s - 1).(n_s - 1).n_e \quad (1)$$



Şekil 3. Sistemin hidrolik devresi (Hydraulic circuit diagram of the system)

Burada n_s faktörlere ait seviye sayısı, n_f faktör sayısı ve n_e de değerlendirilecek etkileşim sayısı olup, deney planı da sırasıyla 2, 4 ve 6 dır. Buna göre, toplam serbestlik derecesi 10 olup, Deneylerde 15 sütun ve 16 satırdan oluşan 15 serbestlik dereceli L16'lık ortogonal dizi seçilmiştir (Tablo 2). Bu dizi aynı zamanda deney planını oluşturmakta olup, dizideki 16 satır parametrelerin farklı kombinasyonlarındaki deneyleri ifade etmektedir. Dizinin sütunlarına faktör ve bunlara ait etkileşimler atanmaktadır. Şekil 4'deki lineer grafikte görüldüğü gibi dizideki birinci sütun ilerleme oranına, ikinci sütun hareket mesafesine dördüncü sütun atalet yüküne, sekizinci sütun yöne ve geri kalanlar da etkileşimlere atanmıştır.



Şekil 4. L16 ortogonal matrisin lineer grafik uygulaması [22] (Linear graph application of L16 orthogonal array)

4. İSTATİSTİKSEL ANALİZ (STATISTICAL ANALYSIS)

L16 deney planı esas alınarak gerçekleştirilen deney sonuçları (Tablo 3), sinyal gürültü oranı (S/N) analizi ve varyans analizi (ANOVA) ile %95 güven seviyesinde değerlendirilmiştir.

4.1. Sinyal/Gürültü Oranı Analizi (Signal/Noise Ratio Analysis)

Taguchi metodu sisteme ait varyasyonu ölçmek için bir genel S/N oranı kullanır. Karakteristiklerin tipine bağlı olarak birçok S/N oranı vardır ki bunlar: S/N oranı değeri küçük değer iyi, büyük değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir. Düşük pozisyonlama hatası daima tercih edildiğinden küçük değer iyi sinyal gürültü oranı seçilmiş olup, aşağıda buna ait eşitlik verilmektedir:

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

Burada n ölçüm sayısı, y ölçülen karakteristik değer (pozisyonlama hatası), S/N oranı birimi db (desibel) dir. Tablo 3'de deney sonuçlarına ait S/N oranları verilmektedir.

4.2. Varyans Analizi (Analysis of Variance)

Çalışmada, ilerleme oranı, hareket mesafesi, atalet yükü, yön ve bunlara ait ikili etkileşimlerin pozisyonlama hatası üzerindeki etkilerini incelemek için ANOVA gerçekleştirilmiştir. Ortalama sonuçlara ve S/N oranlarına ait ANOVA değerleri sırasıyla Tablo 4 ve 5'de gösterilmektedir. ANOVA'da ilgili parametrenin anlamlılığı ona tekabül eden F değerinin, tablodan elde edilen $F_{0,05}$ değeri ile karşılaştırılması ile belirlenir. Eğer parametreye ait F değeri büyük ise parametre anlamlı kabul edilmektedir. Buna göre; ilerleme oranı, hareket mesafesi, ilerleme oranı-hareket mesafesi, ilerleme oranı-yön ve hareket mesafesi-atalet yükü faktör ve etkileşimlerinin pozisyonlama hatası üzerinde anlamlı olduğu görülmektedir. S/N oranına ait ANOVA'da da paralel sonuçlar elde edilmiş olup, sadece hareket mesafesi-atalet yükü etkileşiminin anlamlı olmadığı görülmek-

Tablo 2. Sistemde kullanılan L16 ortogonal dizi (L16 orthogonal array used in the system)

DENEY NO	SÜTUN NO														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	A	B	AXB	C	AXC	BXC	-	D	AXD	BXD	-	CXD	-	-	-
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Tablo 3. Deneysel sonuçlar ve S/N oranları (Experimental results and S/N ratios)

Deney No	İlerleme oranı (A)	Hareket mesafesi (B)	Atalet yükü (C)	Yön (D)	H _{ort}	S/N
1	10	5	5	+	0.067	23.4785
2	10	5	5	-	0.06	24.43697
3	10	5	50	+	0.113	18.93843
4	10	5	50	-	0.06	24.43697
5	10	20	5	+	0.093	20.63034
6	10	20	5	-	0.093	20.63034
7	10	20	50	+	0.12	18.41638
8	10	20	50	-	0.06	24.43697
9	1000	5	5	+	0.253	11.93759
10	1000	5	5	-	0.287	10.84236
11	1000	5	50	+	0.306	10.28557
12	1000	5	50	-	0.34	9.370422
13	1000	20	5	+	0.88	1.110347
14	1000	20	5	-	1.02	-0.172
15	1000	20	50	+	0.807	1.862529
16	1000	20	50	-	0.92	0.724243

tedir. ANOVA'nın son sütununda faktörlerin sonuç üzerindeki etki derecesini ifade eden yüzdelik oranlar verilmiştir. Buna göre ilerleme oranı %58.032'lik oranla pozisyonlama hatasını üzerinde dominant bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bunu etkinlik derecesine göre, hareket mesafesi (%21.199), ilerleme oranı-hareket mesafesi (%19.023), ilerleme oranı-yön (%0.641) ve hareket mesafesi-atalet yükü (%0.354) işlem parametreleri izlemektedir (Tablo 4).

4.3. Optimum Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi (Determination of Optimal Factor Levels)

Optimum faktör seviyeleri ortalamalara ait ANOVA, ana etkiler ve etkileşim grafikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 5'e göre ilerleme oranı ve hareket mesafelerinin 1. seviyelerinde minimum pozisyonlama hatası elde edildiği açıktır. İlerleme oranı-yön ve hareket mesafesi-yön etkileşimleri Şekil 6'ya göre değerlendirildiğinde, en iyi seviyeler sırasıyla A₁D₂ ve B₁C₁ dir. Buna göre optimum seviyeler A=10mm/dk, B=5mm, C=5kg ve D="+" olarak elde edilmiştir.

Tüm faktörlerin dikkate alındığı AxD ve BxC etkileşimleri kullanılarak Eş. 3'e göre optimum pozis-

yonlama hatası hesaplanabilir.

$$T_{opt} = ORT_{A_1D_2} + ORT_{B_1C_1} - T_{ort} \quad (3)$$

Burada $ORT_{A_1D_2}$, A faktörünün birinci, D faktörünün ikinci seviyesinde gerçekleştirilen deneylere ait ortalamalar (2, 4, 6 ve 8 nolu deneyler, $H_{ort}=0.068\text{mm}$), $ORT_{B_1C_1}$ B ve C faktörlerinin 1. seviyesinde gerçekleştirilen deneylere ait ortalamalardır (1, 2, 9 ve 10 no'lu deneyler, $H_{ort}=0.167$). T_{ort} , ise tüm deneylere ait ortalamayı ifade etmekte olup, 0.342mm dir. Bu verilere göre tahmini optimum pozisyonlama hatası $T_{opt}=0.107\text{mm}$ olarak elde edilmiştir.

Taguchi'nin son uygulama basamağı olan tahmin edilen optimum değer için güven aralığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [22]:

$$CI = \left(F_{0.05}(1, df_e) \cdot V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right] \right)^{1/2} \quad (4)$$

Burada $F_{0.05}(1, df_e)$ 0.05 anlamlılık seviyesinde 1'e ve

Tablo 4. Ortalamalar için ANOVA sonuçları (ANOVA results for means)

Kaynak	DF	SS	Varyans	F	SS'	%Dağılım
İlerleme oranı (A)	1	1.07485	1.07485	3634.93	1.07455	58.032
Hareket mesafesi (B)	1	0.39282	0.39282	1328.44	0.39252	21.199
Atalet yükü (C)	(1)	(0.00005)	-	Çekilmiş	-	-
Yön (D)	(1)	(0.00253)	-	Çekilmiş	-	-
A*B	1	0.35254	0.35254	1192.22	0.35224	19.023
A*C	(1)	(0.00072)	-	Çekilmiş	-	-
A*D	1	0.01216	0.01216	41.12	0.01186	0.641
B*C	1	0.00685	0.00685	23.17	0.00655	0.354
B*D	(1)	(0.00214)	-	Çekilmiş	-	-
C*D	(1)	(0.00111)	-	Çekilmiş	-	-
Genişletilmiş hata	42	0.01242	2.957x10 ⁻⁴	-	0.01391	0.751
Toplam	47	1.85164			1.85164	100

DF: Serbestlik derecesi, SS: Karelerin toplam, SS': Saf karelerin toplamı, $F_{0.05,1,42}=4.07$

Tablo 5. S/N oranı için ANOVA sonuçları (ANOVA results for S/N ratios)

Kaynak	DF	SS	Varyans	F	SS'	%Dağılım
İlerleme oranı (A)	1	1047.23	1047.23	423.12	1044.755	81.113
Hareket mesafesi (B)	1	132.75	132.75	53.64	130.275	10.114
Atalet yükü (C)	(1)	(1.22)	-	Çekilmiş		
Yön (D)	(1)	(4.05)	-	Çekilmiş		
A*B	1	62.94	62.94	25.43	60.465	4.694
A*C	(1)	(0.14)	-	Çekilmiş		
A*D	1	17.87	17.87	7.22	15.395	1.195
B*C	(1)	(7.43)	-	Çekilmiş		
B*D	(1)	(0.04)	-	Çekilmiş		
C*D	(1)	(7.40)	-	Çekilmiş		
Genişletilmiş hata	11	27.22	2.475	-	37.13	2.883
Toplam	15	1288.02			1288.02	100

DF: Serbestlik derecesi, SS: Karelerin toplam, SS': Saf karelerin toplamı, $F_{0.05,1,11}=4.84$

hatanın serbestlik derecesine göre tablolardan elde edilen F değeridir ($F_{0.05,1,42}=4.07$). V_e (2.957×10^{-4}) hataya ait varyans değerini ifade ederken, R de doğrulama deney sayısıdır (3) n_{eff} ise etkin tekrar sayısı olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (5)$$

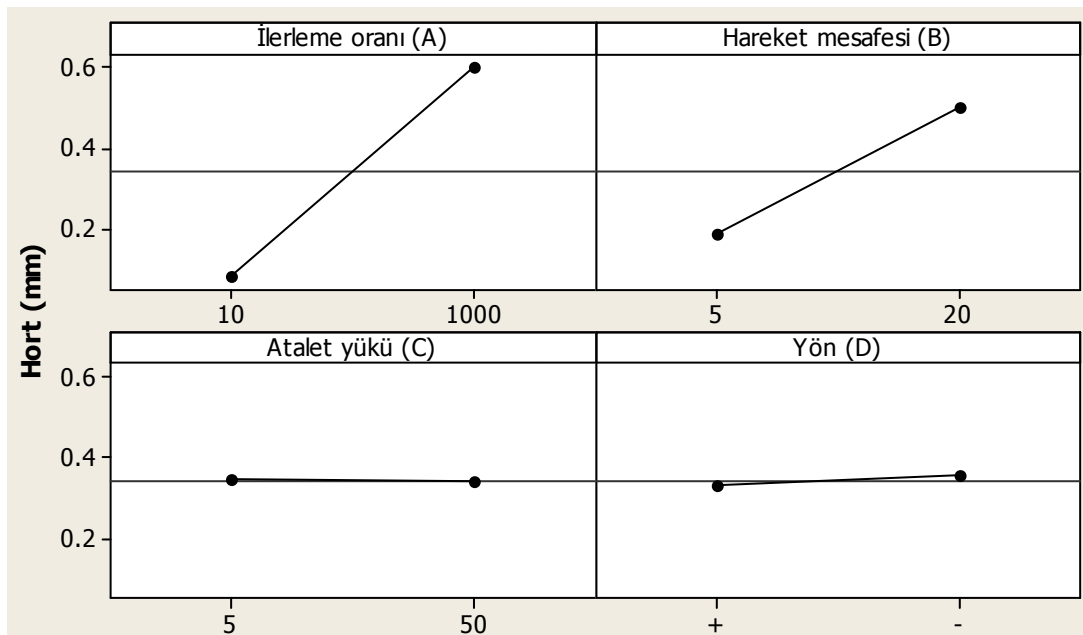
Burada, N toplam deney sayısını (48), V_t de, ortalamanın hesaplandığı işlem parametrelerine ait toplam serbestlik derecesidir (2). Buna göre, n_{eff} , 16 olarak hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında güven aralığı 0.022 olarak bulunmuştur.

Optimum şartlarda (A=10mm/dk, B= 5mm, C= 5kg ve D= "-") gerçekleştirilen üç adet doğrulama testlerinde sırasıyla 0.086, 0.095 ve 0.086mm'lik ölçümler gerçekleştirilmiş olup, ortalama 0.089'lik pozisyonlama hatası elde edilmiştir. Bu değer, hesaplanan güven aralığının içerisinde olduğu ve metodun sistemin optimizasyonunu anlamlı olarak gerçekleştirdiği görülmektedir.

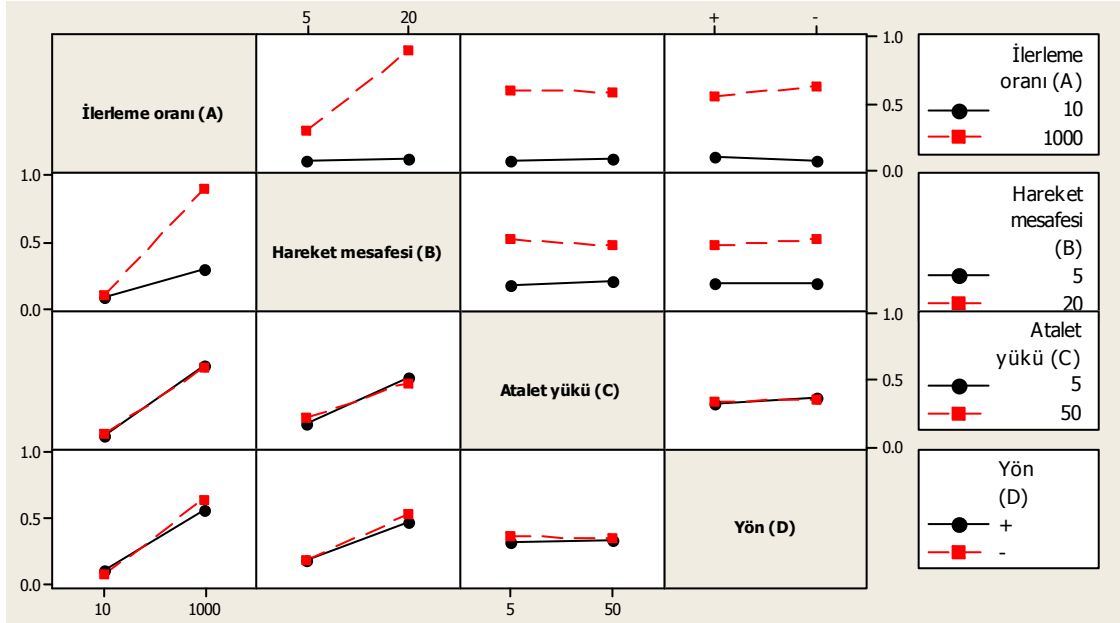
5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

CNC ile denetlenen hidrolik pozisyonlama sistemi ile gerçekleştirilen doğrusal pozisyonlama hareketlerinin optimizasyonu Taguchi metodu ile gerçekleştirilmiştir. İlerleme oranı, hareket mesafesi, atalet yükü ve yön işlem parametrelerinin farklı kombinasyonlarında L16 ortogonal dizi esas alınarak yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Faktörlerin ana etkileri dikkate alındığında; ilerleme oranı, hareket mesafesi faktörleri pozisyonlama hatası üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu yön ve atalet yükünün ise anlamlı olmadığı belirlenmiştir.
- Faktörlere ait ikili etkileşimlerde ise; sadece ilerleme oranı-yön ve hareket mesafesi-atalet yükü etkileşimlerinin istatistiksel olarak anlamlı oldukları görülmüştür.
- İlerleme oranı %58.032'lik oranla pozisyonlama hatasını üzerinde dominant bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu parametreyi hareket mesafesi (%21.199), ilerleme oranı-



Şekil 5. Ortalama pozisyonlama hatası (H_{ort}) için ana etkiler grafiği (Main effects plot for average positioning error (H_{ort}))



Şekil 6. Ortalama pozisyonlama hatası (Hort) için etkileşim grafiği (Interaction plot for average positioning error)

hareket mesafesi (%19.023), ilerleme oranı-yön (%0.641) ve hareket mesafesi-atalet yükü (%0.354) faktör ve etkileşimleri etkinlik sırasına göre izlemektedir.

- ANOVA, ana etkiler ve etkileşimlere ait grafikler esas alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda; optimum pozisyonlama hatası ilerleme oranının birinci (A=10mm/dk), hareket mesafesinin birinci (B= 5mm), Yönün ikinci (C=2) ve atalet yükünün birinci (D=5kg) seviyelerinde elde edilmiş olup, 0.108mm olarak hesaplanmıştır.
- Optimum şartlarda gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde sırasıyla 0.086, 0.095 ve 0.086mm'lik ölçümler gerçekleştirilmiş olup, ortalama 0.089mm'lik pozisyonlama hatası elde edilmiştir. Değerin hesaplanan güven aralığı sınırlarında olduğu ve metodun optimizasyonu yeterli doğrulukta gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, maddi katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no: 07/2003-20) tasarım ve imalat aşamasındaki desteklerinden dolayı KFI Kartal FCMP Otomotiv'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Shih, M.C. and Sheu, Y.R., "The Adaptive Position Control of an Electro-Hydraulic Servo Cylinder", *JSME International Journal. Series C, Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 34(3) (1991) 370-376.
2. Bobrow, J.E. and Lum, K., "Adaptive, High Bandwidth Control of a Hydraulic Actuator", In *American Control Conference Proceedings of the 1995* (1995) 71-75.
3. Hori, N., Pannala, A.S., Ukrainetz, P.R. and Nikiforuk, P.N., "Design of an Electro-Hydraulic Positioning System Using a Novel Model Reference Control Scheme", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 111 (1989) 292-298.
4. Plummer, A.R. and Vaughan, N.D., "Robust Adaptive Control For Hydraulic Servo Systems", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 118 (1996)237-244.
5. Lee, S.R. and Srinivasan, K., "Self-Tuning Control Application to Closed-Loop Servo-Hydraulic Material Testing", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 112 (1990) 681-689.
6. Sohl, G.A., and Bobrow, J.E., "Experiments and Simulations on the Nonlinear Control of a Hydraulic Servo System", *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 7 (2) (1999) 238-247.
7. Chern, T.L. and Wu, Y.C., "Design of Integral Variable Structure Controller and Application to Electro-Hydraulic Velocity Servo Systems", *Control Theory and Applications* 138(5) (1991) 439-444.
8. Lee, K.I. and Lee, D.K., "Tracking Control of a Single-Rod Hydraulic Cylinder Using Sliding Mode", In *Proceedings of the 29th IEEE Conference Tokyo-Japan* (1990) 865-868.
9. Hwang, C.L. and Lan, C.H., "The Position Control of Electro-Hydraulic Servo Mechanism Via a Novel Variable Structure Control", *Mechatronics* 4 (4): (1994) 369-391.
10. Hung, J.C., "Chattering Handling For Variable Structure Control Systems", *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*,

- Proceedings of the IECON '93** (1993) 1968-1972.
11. Hwang, C.L., "Sliding Mode Control Using Time-Varying Switching Gain And Boundary Layer For Electro-Hydraulic Position and Differential Pressure Control", **IEE Proceedings Control Theory & Applications** 143(4) (1996) 325-332.
 12. Chen, H.M., Renn, J.C. and Su, J.P., "Sliding Mode Control With Varying Boundary Layers For an Electro-Hydraulic Position Servo System", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 26 (1) (2005) 17-123.
 13. Gao, W.B. and Hung, J.C., "Variable Structure Control of Nonlinear Systems: a New Approach", **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 40(1) (1993) 45-55.
 14. Jerouane, M., Sepehri, N. and Lagarrigue, F.L., "Dynamic Analysis of Variable Structure Force Control of Hydraulic Actuators Via The Reaching Law Approach", **International Journal of Control** 77 (14) (2004) 1260-1268.
 15. Hung, J.Y. and Hung, J.C., "Chatter Reduction in Variable Structure Control", **Industrial Electronics, Control and Instrumentation, ECN '94** 3 (1994) 1914-1918.
 16. Altıntaş, Y., and Lane, A. J., "Design of an Electro-Hydraulic CNC Press Brake", **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 37 (1) (1997) 45-59.
 17. Pinar, A.M., ve Güllü, A., "Hidrolik Tahrikli Sayısal Denetimli Cihaz, Bölüm 1: Sistemin Yapılandırılması", **Soma M.Y.O. Teknik Bilimler Dergisi** 2(10) (2008) 17-30.
 18. Pinar A.M., ve Güllü, A., "Hidrolik Tahrikli Sayısal Denetimli Cihaz. Bölüm 2: Doğrusal İnterpolasyon Hareketlerinin İncelenmesi", **Soma M.Y.O. Teknik Bilimler Dergisi** 2(10) (2008) 31-43.
 19. Pinar, A.M., **Hidrolik Tahrikli Sayısal Denetimli Bir Sistemde Dairesel İnterpolasyon Hareketlerinin Analizi**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara, 2006.
 20. Taguchi, G., Elsayed, E.A. and Hsiang T., **Quality Engineering in Production Systems**, McGraw-Hill, New York, 1989.
 21. Chang, C., Kuo, C., "Evaluation of Surface Roughness in Laser-Assisted Machining of Aluminum Oxide Ceramics With Taguchi Method", **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 47 (2007) 141-147.
 22. Ross, P.J., **Taguchi Techniques for Quality Engineering**, McGraw-Hill Book Company, 1988.