

ISSN 1302-9487

# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt : 6

Sayı : 2

Kasım 2004



Makina Mühendisliği Bölümü  
ODTÜ - ANKARA

## Sahibi

Makina Tasarım ve İmalat Derneği adına Yönetim Kurulu Başkanı  
Bilgin KAFTANOĞLU

ODTÜ

## Yayın Kurulu

Metin AKKÖK  
Can ÇOĞUN  
İlhan KONUKSEVEN (Sorumlu Yayın Yönetmeni)

ODTÜ  
Gazi Ü  
ODTÜ

## Danışma Kurulu

M.A. Sahir ARIKAN  
Tuna BALKAN  
Erhan BUDAK  
Melik DÖLEN  
Hüseyin FILİZ  
Necdet GEREN  
Mustafa İ. GÖKLER  
Erk İNGER  
H. Ali ERTAŞ  
Haydar LİVATYALI  
Ferruh ÖZTÜRK  
Levend PARNAS  
Ömer SAATÇIOĞLU  
O. Selçuk YAHŞI  
Orhan YILDIRIM

ODTÜ  
ODTÜ  
Sabancı Ü  
ODTÜ  
Gaziantep Ü  
Çukurova Ü  
ODTÜ  
BOREN-ODTÜ  
Cumhuriyet Üniv.  
İTÜ  
Uludağ Ü.  
ODTÜ  
ODTÜ  
ENVY A.Ş.  
ODTÜ

## Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

Makina Tasarım ve İmalat Derneği  
Makina Mühendisliği Bölümü, E Blok, No. 101  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
06531 ANKARA

Tel : (312) 210 52 12, Faks : (312) 210 12 75

Web : <http://www.me.metu.edu.tr/matim>

e-mail : [matim@metu.edu.tr](mailto:matim@metu.edu.tr)



# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 6 Sayı: 2 Kasım 2004

JOURNAL OF  
MECHANICAL DESIGN  
AND PRODUCTION

Vol: 6 No: 2 Kasım. 2004

ISSN 1302-9487

## TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ'nindir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

## ABONE KOŞULLARI

Yıllık abone bedeli 2005 yılı içinde gerçek kişiler için 8.00 YTL, firma ve kuruluşlar için 35.00 YTL, öğrenciler için 4.00 YTL'dir. Abone olmak için aşağıda verilen banka hesabına abone bedelinin yatırılması ve açık adresiniz ile banka makbuzunun adresimize gönderilmesi yeterlidir.

## TANITIM KOŞULLARI

Kuruluş ve ürünlerini tanıtmak isteyenler hazırlayacakları tanıtım yazı ve resim taslaklarını Derneğimiz'e göndererek saptanacak bir katkı karşılığında Dergi'de yayımlanmasını sağlayabilirler.

## BANKA HESAP NUMARASI

T. İş Bankası, ODTÜ Şubesi  
Hesap No: 4229 30441 0235339

## DİZGİ

Hülya SEVER

## BASKI

ODTÜ Basım İşliği

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

## İÇİNDEKİLER

### ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Araç Dinamiğinin Tek İzli Araç Modeli Yardımıyla  
Tanılanması 61  
**Kutluk Bilge ARIKAN**  
**Y. Samim ÜNLÜSOY**

Paralel Manpülatörlerin Tahrik Dejenerasyon  
Konumlarında Hareketi 70  
**S. Kemal İDER**

Lepleme İşleminde İş Malzemesi Sertliğinin Yüzey  
Pürüzlülüğüne Etkisi 81  
**Hikmet ÇALIMLI**  
**Abdulkadir GÜLLÜ**

Plastik Enjeksiyon Kalıpcılığında Üründeki Kaynak  
Yeri Probleminin Deneysel Olarak İncelenmesi 88  
**Babür ÖZÇELİK**  
**Recep UYAROĞLU**

Endüstriyel Bir Robot İçin İnsan-Makine Arayüz  
Programının Geliştirilmesi 99  
**Mahir Cihan CENGİZ**  
**Bilgin KAFTANOĞLU**

YAKIN GELECEKTEKİ KONGRE VE  
BİLİMSEL ETKİNLİKLER 108

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye’de daha yaygın dağıtımı sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

## Araç Dinamiğinin Tek İzli Araç Modeli Yardımıyla Tanılanması

Kutluk Bilge Arıkan

Atılım Üniversitesi, Mekatronik  
Mühendisliği Bölümü, Ankara

Y. Samim Ünlüsoy

Prof. Dr.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Ankara

*Tek izli araç modeli yapısı kullanılarak, aracın dönüş dinamiğini anlatan matematiksel modeller tanılanmıştır. ARMAX ve durum uzayı modelleri parametre kestirimlerinde kullanılmıştır. Öngörü hatası kestirimi yöntemi uygulanmıştır. Kestirilen modellerden tek izli araç modelini oluşturan fiziksel parametreler de hesaplanmıştır.*

*Anahtar Kelimeler: Sistem tanılama, parametre kestirimi, öngörü hatası kestirimi yöntemi, tek izli araç modeli, kara-kutu model, gri-kutu model, ARMAX, durum uzayı modeli*

### TERİMLENDİRME

- $C_f$  : Ön aks yan kuvvet katsayısı  
 $C_r$  : Arka aks yan kuvvet katsayısı  
 $J$  : Dönme atalet momenti  
 $m$  : Araç kütlesi  
 $a$  : Ağırlık merkezinin ön aksa olan uzaklığı  
 $b$  : Ağırlık merkezinin arka aksa olan uzaklığı  
 $L$  : Dingil açıklığı  
 $U$  : Araç hızı (sabit)  
 $v$  : Yanal hız  
 $r$  : Dönüş hızı  
 $\delta$  : Ön lastiklerin yönverme açısı  
 $A_y$  : Yanal ivme  
 $T$  : Örneklem periyodu

### GİRİŞ

Sistem tanılaması, dinamik sistemlerin girdi ve çıktılarının gözlenmesi yoluyla matematiksel modellerinin kurulması ile ilgilidir [1]. Matematiksel model yapısı seçiminin ve parametrik hale getirilmesinin ardından; sistem tanılaması, parametre kestirimi problemine dönüşür. Model yapısı seçiminde dinamik sistemi anlatan fiziksel ilişkiler, bağıntılar ve bilgiler göz önüne alınmalıdır. Parametrik model, bu bilgilerin kullanımına göre beyaz-kutu model, gri-kutu model ya da kara-kutu model şeklinde sınıflandırılabilir [2]. Beyaz-kutu modelde, tüm parametreler, sistemin fiziksel incelenmesi ve sistemle ilgili bilgiler neticesinde tamamen bilinmektedir. Gri-kutu modelde,

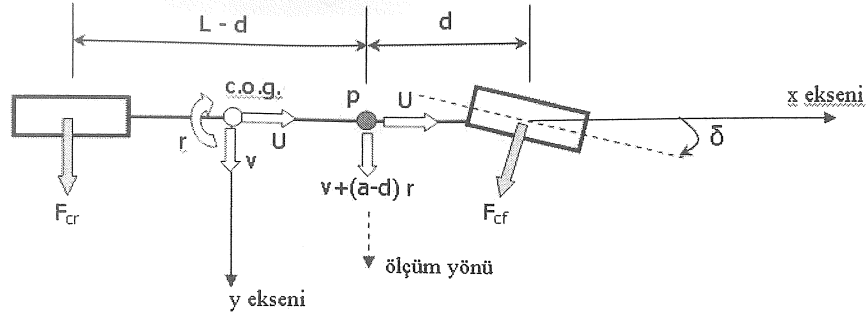
fiziksel bağıntılar ile parametrelerin bir kısmı bilinmektedir. Bilinmeyen parametreler ise toplanan girdi-çıkı verisi kullanılarak kestirilmektedir. Kara-kutu modellemede ise sistem ile ilgili fiziksel bağıntılar mevcut değildir veya kullanılmamaktadır [2]. Kullanılan matematiksel yapı, belirli bir esnekliğe sahip fonksiyonlardan seçilmektedir.

Bu çalışmada, aracın dönüş dinamiği, hareket denklemlerinden yola çıkarak oluşturulan matematiksel ifadeler yardımı ile modellenmiştir. Parametre kestirimi için kara-kutu ve gri-kutu modeller oluşturulmuş, kestirilen parametrelerden fiziksel parametrelere geçiş incelenmiştir.

### DÖNÜŞ DİNAMIĞININ TANILANMASI

Tek izli araç modeli, aracın dönüş dinamiğini incelemek için yaygın olarak kullanılan bir modeldir [4]. Aracın ilerleme hızının sabit olması, yanal ivme değerinin  $0.3 \text{ g}$  değerinin altında olması ve doğrusal bir model için lastiklerin kayma açılarının küçük değerler alması, bu modelde yapılan varsayımlardır.

Varsayımlar neticesinde ön lastikler, aynı kayma açılarına sahip olduklarından önde tek bir lastik gibi düşünülebilir. Aynı şekilde, arka lastikler de arkada tek bir lastik gibi kabul edilebilir. Bunlara ilave olarak, yukarıda belirtilen şartlar altında, aracın süspansiyonları esneklik göstermezler. Başka bir ifadeyle, asılı gövde ve asılı olmayan gövde arasında göreceli bir hareket oluşmaz. Yukarıda belirtilenler neticesinde aracın basitleştirilmiş fiziksel modeli Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Fiziksel model, parametreler ve değişkenler

Bu şartlar altında ön ve arka akslarda oluşan yanal lastik kuvvetleri, lastik kayma açıları  $\alpha_f$  ve  $\alpha_r$  cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir [4]:

$$\begin{aligned} F_{cf} &= C_f \alpha_f \\ F_{cr} &= C_r \alpha_r \end{aligned} \quad (1)$$

#### Matematiksel Model

Bu çalışmada tek izli araç modeli, parametre kestiriminde kullanılacak modeller için temel yapı olarak kullanılmıştır. Bu modelde, aracın dönüş dinamiği, Newton'un hareket denklemleri kullanılarak modellenmiştir. Hız bileşenleri, ağırlık merkezine yerleştirilen ve araçla birlikte hareket eden eksen takımına göre tanımlanmıştır. Durum değişkenleri olarak yanal kayma hızı ve dönme hızı seçilmiştir. Sürekli zaman durum denklemleri, fiziksel parametreler kullanılarak aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mU} & \frac{aC_f - bC_r - U}{mU} \\ \frac{aC_f - bC_r}{JU} & \frac{a^2C_f + b^2C_r}{JU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} \\ -\frac{aC_f}{J} \end{bmatrix} \delta \end{aligned} \quad (2)$$

Durum denklemlerinin tamamlanabilmesi için, sistemin çıktılarının da tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, yanal ivmeyi ölçmek için ivme ölçer ve dönme hızını ölçmek için jiroskop kullanıldığı varsayılmıştır. Araç hızı sabit olduğundan ve durum denklemlerinde bir parametre olarak kullanıldığından, değerinin bilindiği varsayılmıştır. Sürücünün uyguladığı direksiyon girdisi, ön

lastiklerin yönverme açısı olarak sistemin tek girdisidir.

İvme ölçer, aracın ağırlık merkezine yerleştirilirse okuduğu değer aşağıdaki şekilde ifade edilebilir. (1)

$$\begin{aligned} A_y &= \dot{v} + U r + w_a = \left( \frac{C_f + C_r}{mU} \right) v \\ &+ \left( \frac{aC_f - bC_r}{mU} \right) r + \left( -\frac{C_f}{m} \right) \delta + w_a \end{aligned} \quad (3)$$

İvme ölçer, ağırlık merkezine değil de, x-ekseni üzerindeki herhangi bir  $p$  noktasına (Şekil-1) yerleştirilirse, algılayıcı çıktısı parametrik olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} A_y^p &= \dot{v} + (a-d)\dot{r} + U r + w_a \\ &= \left( \frac{C_f + C_r}{mU} + (a-d)\frac{(aC_f - bC_r)}{JU} \right) v \\ &+ \left( \frac{aC_f - bC_r}{mU} + (a-d)\frac{(a^2C_f + b^2C_r)}{JU} \right) r \\ &+ \left( -\frac{C_f}{m} - (d-a)\frac{aC_f}{J} \right) \delta + w_a \end{aligned} \quad (4)$$

Bu çalışmada, ağırlık merkezinin konumunun bilinmediği varsayımı sonucunda, ivme ölçerin,  $p$  noktasına yerleştirildiği kabul edilmiştir. Durum denklemleri, aşağıda verilen çıktı denklemi ile tamamlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} A_y^p \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mU} + (a-d) & \frac{aC_f - bC_r}{mU} + (a-d) \frac{(a^2 C_f + b^2 C_r)}{JU} \\ \frac{(aC_f - bC_r)}{JU} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} - (d-a) \frac{aC_f}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} w_a \\ w_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bu denklemde  $w_a$  ve  $w_g$ , algılayıcılardaki (sırasıyla ivme ölçer ve jiroskoptaki) gürültüyü temsil etmektedir. Gerçek sistemden geldiği varsayılan algılayıcı çıktıları, gürültü sinyellerinin de eklendiği, doğrusal bir matematiksel modelin kullanıldığı benzetimden elde edilmiştir.

### Parametre Kümeleri

Kestirilecek parametreler için çeşitli seçenekler düşünülebilir. Bilinmeyen fiziksel parametrelerin oluşturduğu küme aşağıda verilmiştir.

$$\Theta_f = [C_f \quad C_r \quad J \quad a]^T \quad (6)$$

Aracın kütesinin ve ivme ölçerin konumunu belirten  $d$  uzaklığının bilindiği varsayılmıştır. Alternatif parametre kümeleri de düşünülebilir. Toplanan veri, girdi ve çıktılardan oluştuğu için sistemin aktarım işlevini kullanmak, girdi ve çıktı arasında doğrudan bir matematiksel yapı tanımlamak için daha uygundur. Denklem (7) aktarım işlevi ifadelerini sunmaktadır.

$$G_1(s) = \frac{A_y^p(s)}{\Delta(s)} = \frac{c_1 s^2 + c_2 s + c_3}{s^2 + c_4 s + c_5} \quad (7a)$$

$$G_2(s) = \frac{R(s)}{\Delta(s)} = \frac{c_6 s + c_7}{s^2 + c_4 s + c_5} \quad (7b)$$

Aktarım işlevlerinde kullanılan parametreler de kestirilecek parametre kümesi olarak düşünülebilir. Aktarım işlevi parametrelerinin, fiziksel parametreler cinsinden ifadeleri aşağıda sunulmuştur.

$$c_1 = C_f \left[ \frac{m a (d - a) - J}{m J} \right] \quad (8a)$$

$$c_2 = \frac{C_f C_r L (L - d)}{m U J} \quad (8b)$$

$$c_3 = \frac{C_f C_r L}{m J} \quad (8c)$$

$$c_4 = - \left[ \frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{U J} + \frac{C_f + C_r}{U m} \right] \quad (8d)$$

$$c_5 = \frac{C_f C_r L^2}{m J U^2} - \frac{b C_r - a C_f}{J} \quad (8e)$$

$$c_6 = - \frac{a C_f}{J} \quad (8f)$$

$$c_7 = \frac{C_f C_r L}{m U J} \quad (8g)$$

Tanımlama işlemi, girdi ve çıktı örneklemeleri kullanılarak yapılacağından, yukarıdaki sürekli zamanda tanımlanmış aktarım işlevlerinin, kesikli zamanda ifade edilmeleri daha uygundur. Kesikli zaman aktarım işlevleri, eşitlik (9) da verilmiştir..

$$G_1(z) = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (9a)$$

$$G_2(z) = \frac{b_3 z + b_4}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (9b)$$

Kesikli zaman aktarım işlevleri parametreleri ile, sürekli zaman aktarım işlevleri parametreleri arasında ilişki eşitlik (10)'da verilmiştir.



$$a_1 = c_4 T - 2 \quad (10a)$$

$$a_2 = 1 + c_5 T^2 - c_4 T \quad (10b)$$

$$b_0 = c_1 \quad (10c)$$

$$b_1 = c_2 T - 2 c_1 \quad (10d)$$

$$b_2 = c_1 + c_3 T^2 - c_2 T \quad (10e)$$

$$b_3 = c_6 T \quad (10f)$$

$$b_4 = c_7 T^2 - c_6 T \quad (10g)$$

Kesikli zaman aktarım işlevlerinin parametrelerinin oluşturduğu küme aşağıda verilmiştir.

$$\Theta_d = [a_1 \ a_2 \ b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]^T \quad (11)$$

Fiziksel parametre kümesinden bu kümeyi oluşturmak kolaydır. Ancak  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ , ...,  $b_4$  parametreleri, fiziksel parametrelerin karmaşık ve doğrusal olmayan işlevlerinden oluştuğu için bu kümeden fiziksel parametrelere dönmek her sistem için kolay olmayabilir.

Taşıma işlevleri yerine ARMAX modeli kullanmak tanılama algoritması için daha uygundur. Aktarım işlevleri kullanılarak ARMAX modeline kolaylıkla ulaşılabilir [5], [6].

$$y_1 = A_y^p, \quad y_2 = r$$

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 : \text{Gürültü ifadeleri} \quad (12)$$

$$y_1(k) + a_1 y_1(k-1) + a_2 y_1(k-2) =$$

$$b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \varepsilon_1(k) + k_1 \varepsilon_1(k-1) + k_2 \varepsilon_1(k-2)$$

$$y_2(k) + a_1 y_2(k-1) + a_2 y_2(k-2) =$$

$$b_3 u(k-1) + b_4 u(k-2) + \varepsilon_2(k) + k_3 \varepsilon_2(k-1) + k_4 \varepsilon_2(k-2)$$

### Parametre Kestirim Yöntemi

Bu çalışmada parametre kestirim metodu olarak *öngörü hatası kestirimi yöntemi* kullanılmıştır [3]. Bu yöntem, çeşitli model yapıları ile kullanılabilir. Tanımlanan modellerin asimtotik özellikleri istenen düzeydedir ve *en büyük olabilirlik kestirim yöntemi* [1] ile aynı sonuçları verdiği durumlar mevcuttur. Bu

avantajların yanında, optimal parametrelerin bulunmasında, yerel minimumların çokluğu gibi zorluklar yaşanabilmektedir.

Seçilen model, bir sonraki zamanda alınacak çıktıyı öngöreceği şekilde tanımlanır:

$$\hat{y}_m(t|t-1) = f(Z^{t-1}) \quad (13)$$

$$Z^N = \{u(1), y(1), u(2), y(2), \dots, u(N), y(N)\} \quad (14)$$

$u(t)$ : t zamanındaki girdi

$y(t)$ : t zamanındaki çıktı

Öngörücü parametrik hale getirilir:

$$\hat{y}_m(t | \Theta) = f(Z^{t-1}, \Theta) \quad (15)$$

$\Theta$ : Kestirilecek parametre kümesi

Uygun bir norm içersinde, gözlemlenen veri kullanılarak,

$$\hat{y}(1 | \Theta), \dots, \hat{y}(N | \Theta) \text{ ve } y(1), \dots, y(N) \text{ arasındaki}$$

farkı en aza indirecek parametre kümesi,  $\hat{\Theta}_N$ , kestirilir.

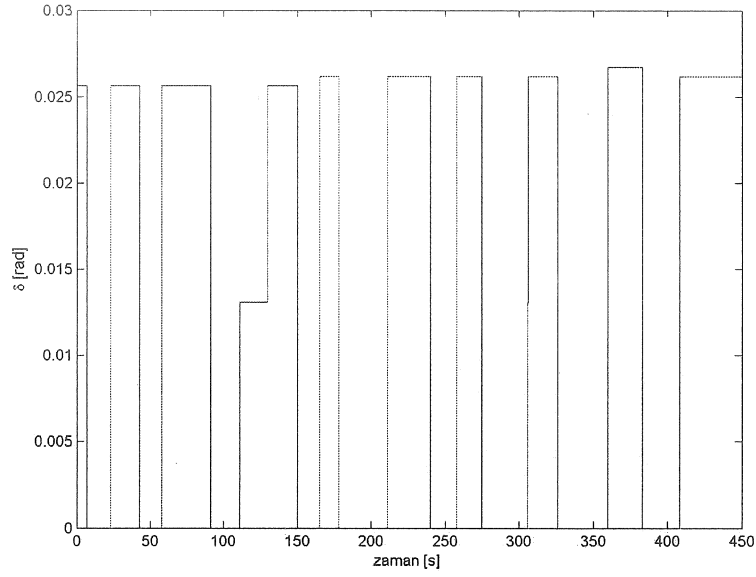
$$\hat{\Theta}_N = \arg \min_{\Theta} V_N(\Theta) \quad (16)$$

$$V_N(\Theta) = \sum_{t=1}^N \left\| y(t) - f(Z^{t-1}, \Theta) \right\|^2 \quad (17)$$

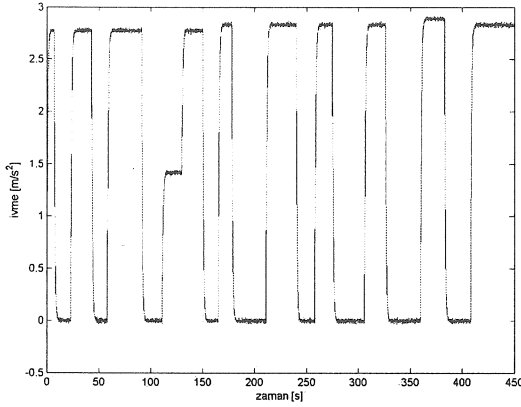
Yukarıdaki ifadeyi minimize eden parametre kümesini,  $\hat{\Theta}_N$ , bulmak için sayısal arama yöntemi kullanılmıştır. Sayısal optimizasyon sırasında Gauss-Newton ve Levenberg-Marquard yöntemleri kullanılmıştır [1], [7].

### Kestirim Yönteminin Uygulanması

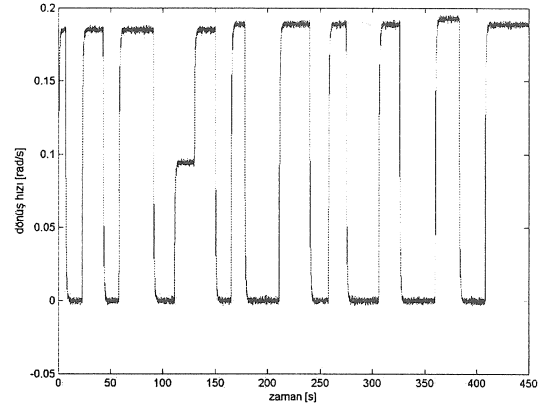
İki farklı öngörücü ile uygulamalar yapılmıştır. Birinci uygulamada ARMAX modeli, ikinci uygulamada ise durum uzayı modeli kullanılmıştır. Her ikisinde de örnekleme periyodu 0.05 saniye ve örnekleme sayısı 9000 olarak alınmıştır. Uygulamalarda kullanılan girdi ve çıktılar aşağıda verilmişlerdir.



Şekil 2 Sistem Girdisi



Şekil 3 p noktasındaki ivme ölçer verisi

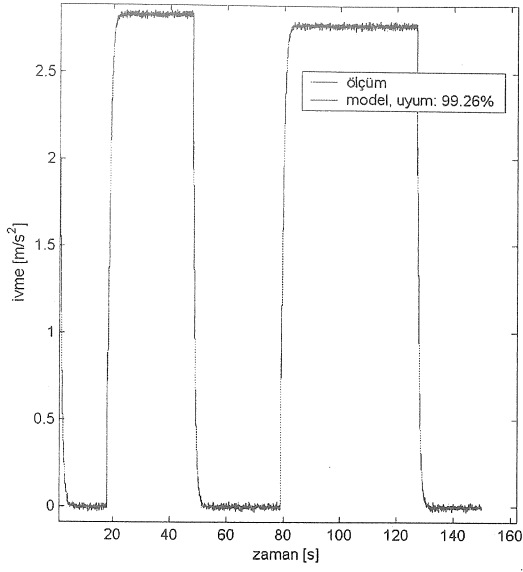


Şekil 4 Jiroskop verisi

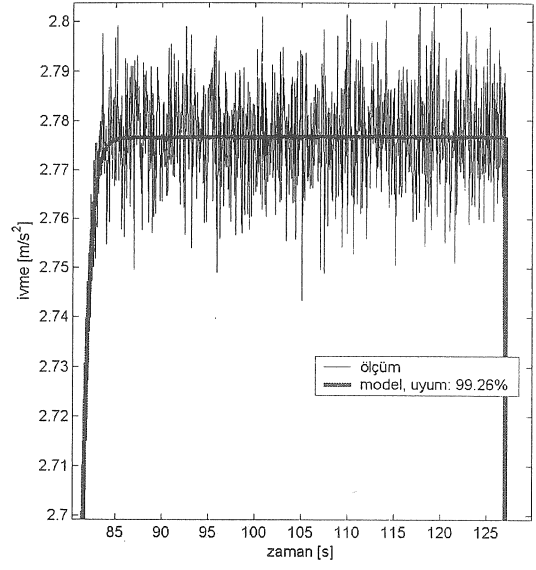
Kara-kutu ARMAX modelinin tanılanması:  
Eşitlik (12)'de verilen ARMAX modeli öngörücü olarak kullanılmıştır. Kestirilen parametre kümesi, eşitlik (11)'de verilmiştir. Optimizasyon için sayısal arama yöntemi kullanıldığından, parametrelerin başlangıç değerleri önemlidir. Doğru parametre

değerlerine ulaşabilmek, yerel minimum değerlerine takılmamak için uygun başlangıç değerleri seçmek gerekmektedir [8], [9]. Öngörü hatası kestirimi yöntemi ile kestirilen parametreler çizelge 1 'de verilmiştir.

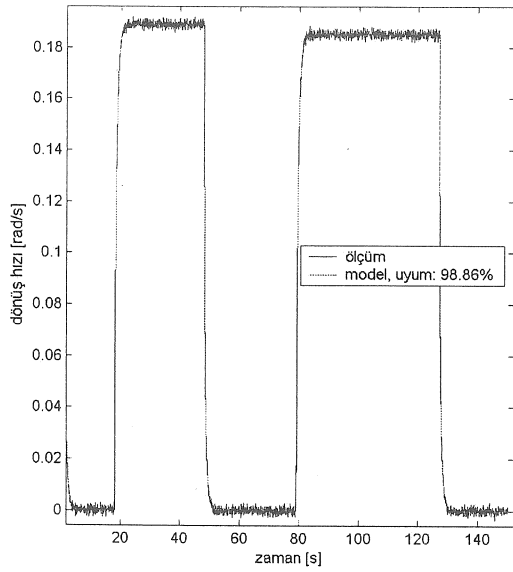
Çizelge 1 Kestirilen ARMAX parametreleri ve gerçek değerleri							
	$a_1$	$a_2$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
gerçek	1.6353	0.6568	34.7727	63.3273	30.8864	1.2273	1.0718
kestirilen	1.6449	0.6656	33.6874	60.5956	28.8586	1.1652	1.0164



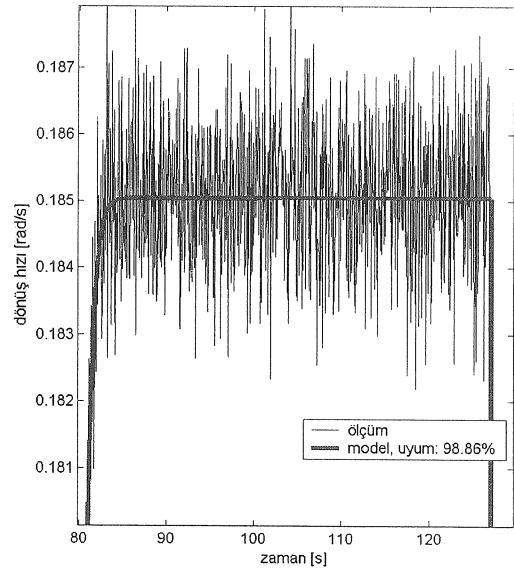
Şekil 5 Model - ivme ölçer verisi karşılaştırması



Şekil 6 Model - ivme ölçer verisi karşılaştırması, yaklaştırılmış



Şekil 7 Model - jiroskop verisi karşılaştırması



Şekil 8 Model - jiroskop verisi karşılaştırması, yaklaştırılmış

Çizelge 2 Hesaplanan fiziksel parametreler ve gerçek değerleri				
	$C_f$	$C_r$	J	a
gerçek	-48000	-35000	2750	1.5
hesaplanan	-50311	-35252	2949	1.37

Tanımlanan modelin geçerliliğinin sınanması gerekmektedir. Parametre kestirimi sırasında kullanılmayan girdi-çıkıtı verisi ile tanımlanan modelin cevabının karşılaştırılması, modeli sınamak için uygulanan yöntemlerden biridir. Aşağıdaki şekillerde bu karşılaştırmalar sunulmuştur.

Kestirilen parametre takımı,  $\hat{\Theta}_d$ , kullanılarak fiziksel parametre takımına,  $\hat{\Theta}_f$ 'e, ulaşılmıştır. Çizelge 2'de fiziksel parametrelerin hesaplanan ve gerçek değerleri verilmiştir.

**Gri-kutu durum uzayı modelinin tanılanması:** Gri-kutu modellerin kara-kutu modellere göre bazı avantajları vardır. Kestirilecek parametre sayısı bu yapılar kullanıldığında azaltılabilir. Bu da parametrelerin istatistiki doğruluğunu artırır. Sistemin fiziksel yapısıyla ilgili bilgilerin modelin içersinde kullanılması da mümkündür. Ancak optimizasyon yüzeyinin daha karmaşık şekillere sahip olması, yerel minimumların artması parametrelerin kestirimini zorlaştırır [9].

Sayısal arama için gerekli başlangıç değerlerinin kalitesine göre, parametre değerleri mutlak minimumun uzağında dolaşabilir, yerel bir minimuma saplanabilir ya da doğru değerlerine yaklaşabilirler. Bu sorunu aşmak için farklı çözümler üzerine çalışmalar yapılmaktadır [1], [3], [8], [9].

Eşitlik (2) ve (4) ile tanımlanan, sürekli zaman durum uzayı modeli kullanılarak aşağıdaki model tanımlanmıştır.

$$\dot{x} = A x + B \delta + \omega \quad (18)$$

$$y = C x + D \delta + e \quad (19)$$

$$A = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} p_5 \\ p_3 p_5 \left( L + \frac{L p_5}{U p_1} + \frac{p_2 + U}{p_1} \right) \\ p_2 + U \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} p_1 + p_3 \left( -d + L + \frac{L p_5 + p_2 + U}{U p_1} \right) & (p_2 + U) + p_4 \left( -d + L + \frac{L p_5 + p_2 + U}{U p_1} \right) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$D = \begin{bmatrix} p_5 + \left( -d + L + \frac{L p_5 + p_2 + U}{U p_1} \right) \left( \frac{p_3 p_5 \left( L + \frac{L p_5}{U p_1} + \frac{p_2 + U}{p_1} \right)}{p_2 + U} \right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu modelde,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mU} & \frac{a C_f - b C_r - U}{mU} \\ \frac{a C_f - b C_r}{JU} & \frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{JU} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} \\ -\frac{a C_f}{J} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mU} + (a-d) \frac{(a C_f - b C_r)}{JU} & \frac{a C_f - b C_r}{mU} + (a-d) \frac{(a^2 C_f + b^2 C_r)}{JU} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} - (d-a) \frac{a C_f}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$\omega, e$  : gürültü terimleri olarak tanımlanmıştır.

Farklı bir parametre kümesi oluşturularak, bu model aşağıdaki matrislerle ifade edilebilir.

$$A = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} p_5 \\ p_6 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} p_1 + p_7 & p_3 & (p_2 + U) + p_7 & p_4 \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$D = \begin{bmatrix} p_5 + p_7 & p_6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Parametrik hale getirilmiş model daha ayrıntılı incelendiğinde,  $p_6$  ve  $p_7$ 'nin  $p_1, \dots, p_5$  parametrelerinin işlevleri olduğu görülür. Yukarıdaki matrisler  $p_1, \dots, p_5$  parametreleri cinsinden yazılabilir.

Gri-kutu modelde ve tanılama işleminde kullanılan parametre kümesi aşağıda verilmiştir.

$$\Theta_g = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5]^T \quad (23)$$

Sürekli zaman model kesikli zamana çevrildiğinde modelin içersinde yer aldığı Kalman öngörücüsü aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \hat{x}(t+T) &= F \hat{x}(t) + G \delta(t) + K (y(t) - C \hat{x}(t) - D \delta(t)) \\ \hat{y}(t | \Theta_g) &= C \hat{x}(t) + D \delta(t) \end{aligned} \quad (24)$$

F, G, ve K matrisleri, A, B, C, ve T'yi kullanarak hesaplanmıştır [10]. K matrisi Kalman kazancıdır. F, G ve K matrislerinin elemanları, gri-kutu modelde kullanılan parametrelerin işlevlerinden oluşmaktadır. Öngörü hatası yöntemiyle kestirilen gri-kutu model parametreleri aşağıda verilmiştir.

Parametre kestirimi sırasında kullanılan girdi-çıkı verisi ile tanılanan modelin cevabının karşılaştırılması, modeli sınamak amacıyla Şekil 9 ve 10'da sunulmuştur.

Fiziksel parametre kümesi,  $\hat{\Theta}_f$ , kestirilen parametre kümesi,  $\hat{\Theta}_g$ , kullanılarak elde edilmiştir. Kestirilen gri-kutu model parametrelerinden fiziksel parametrelerin hesaplanması sırasında (25) eşitlikleri kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} C_f &= -p_5 m \\ C_r &= p_1 m U + p_5 m \\ J &= \frac{m (U + p_2)}{p_3} \\ a &= L + \frac{L p_5 + U^2 + p_2 U}{p_1 U} \end{aligned} \quad (25)$$

Çizelge 4'te fiziksel parametrelerin hesaplanan ve gerçek değerleri verilmektedir

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, doğrusal tek izli araç modeli yardımıyla, aracın dönüş dinamiğinin tanılanması incelenmiştir. Öngörü hatası kestirimi yöntemi kullanılarak, kara-kutu ARMAX modelinin ve gri-kutu durum uzayı modelinin parametreleri kestirilmiştir. Gerçek deneyler yerine, araç modeli kullanılarak benzetimler yapılmış, gürültülü algılayıcı verisi bu benzetimlerden alınmıştır. Modeller, tanılama işleminde kullanılmayan girdi-çıkı verisi ile sınanmış ve başarılı oldukları gözlenmiştir. Her iki uygulamada da kestirilen parametreler kullanılarak sistemin fiziksel parametreleri hesaplanmıştır. Özellikle gri-kutu modellemeye, kestirim yönteminin başarılı çalışabilmesi için başlangıç değerlerinin kaliteli olması gerekmektedir. Bunun için sistemin dinamiği ile ilgili bilgiler kullanılarak çeşitli başlangıç değerleri denenmiştir. Parametrelerin bazılarında sayısal optimizasyon yönteminin başarısını arttırmak amacıyla ölçekleme yapılmıştır. Veri oluşturulması sırasında, aracın ilerleme hızının sabit olduğu ve bilindiği kabul edilmiştir. Aracın kütesinin de bilindiği varsayılmıştır. Bunlar ölçülmesi zor ya da masraflı olan parametreler değildir. Bilinen parametre sayısı arttırıldıkça kestirilen parametrelerin doğruluğu artacaktır.

İki uygulamada da kullanılan model yapısı sayesinde, deneyler sırasında ivme ölçeri aracın ağırlık merkezine yerleştirme gerekliliği yoktur. Bu yaklaşım, deney için gerekli donanımın yerleştirilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca tanılama işlemi için ağırlık merkezinin bilinmesi ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

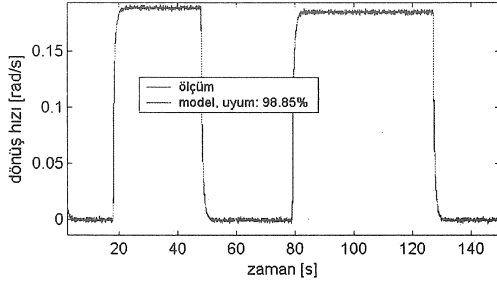
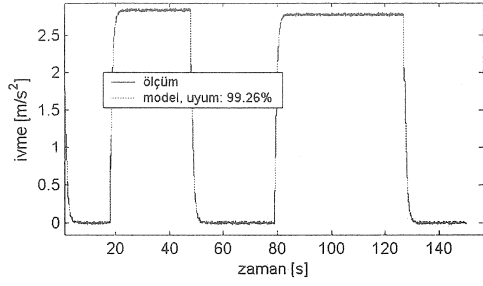
Çizelge 3 Gri-kutu model parametrelerinin gerçek ve kestirilen değerleri

	P1	P2	P3	P4	P5
gerçek	-2.7667	-15.3500	-0.2545	-4.5273	22.5000
kestirilen	-2.7772	-15.3653	-0.2800	-4.7700	24.4020

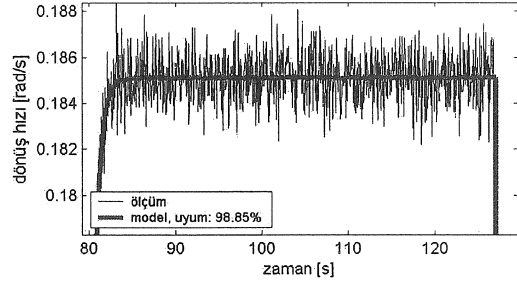
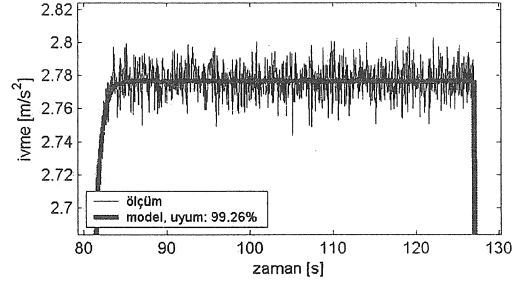
Çizelge 4 Hesaplanan fiziksel parametreler ve gerçek değerleri

	C <sub>f</sub>	C <sub>r</sub>	J	a
gerçek	-48000	-35000	2750	1.5
hesaplanan	-48804	-34512	2610	1.37





Şekil 9 Model - algılayıcı verisi karşılaştırması



Şekil 10 Model – algılayıcı verisi karşılaştırması, yaklaşılmış

#### IDENTIFICATION OF VEHICLE DYNAMIC BEHAVIOR USING A SINGLE TRACK VEHICLE MODEL

A single track (bicycle) model is used to identify the handling behavior of vehicles. ARMAX and state space model structures, and the method of prediction error estimation are used in parameter estimation. Physical parameters of the single track vehicle model are extracted from the identified models.

Keywords: System identification, parameter estimation, method of prediction error estimation, single track vehicle model, black box model, gray box model, ARMAX, state space model

#### KAYNAKÇA

1. Ljung, L., *System Identification, Theory for the User*, PTR Prentice Hall, New Jersey, 1987.
2. Ljung L., *Black-box Models from Input-output Measurements*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest, Hungary, May 21–23, 2001.

3. Ljung L., *Prediction Error Estimation Methods*, Linköping University, Department of Electrical Engineering, Report No.: LiTH-ISY-R-2365.
4. Kiencke U., Nielsen L., *Automotive Control Systems For Engine, Driveline, and Vehicle*, Springer, 2000.
5. Kumar, P. R., Varaiya, P., *Stochastic Systems: Estimation, Identification, and Adaptive Control*, Prentice Hall, 1986.
6. Franklin, G. F., Powell, J. D., Workman M., *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison Wesley Longman, 1998.
7. Ljung, L., *System Identification Toolbox for Use with Matlab, User's Guide, Version 5*, MathWorks Inc.
8. Xie, L., Ljung, L., *Estimate Physical Parameters by Black Box Modeling*, Proc. of the 21st Chinese Control Conference, pp 673 - 677, 2002.
9. Parillo, P. A., Ljung, L., *Initialization of Physical Parameter Estimates*, Linköping University, Department of Electrical Engineering, Report No.:LiTH-ISY-R-2561.
10. Minkler G., Minkler J. *Theory and Application of Kalman Filtering*, Magellan Book Company, USA, 1993.

# Paralel Manipülatörlerin Tahrik Dejenerasyon Konumlarında Hareketi

S. Kemal İder

Prof. Dr.

Makina Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
06531, Ankara

*Paralel manipülatörlerde tahrik ünitelerinin uç elemanının bazı yönlerde kontrolünü kaybettiği tekil konumlar oluşmaktadır. Bu konumlarda, gereken tahrik kuvvetleri sonsuza gitmektedir. Tahrik tekil konumları'ndan yörünge planlaması sırasında kaçınmak manipülatörün hareket bölgesinin önemli ölçüde daralmasına sebep olduğu için iyi bir çözüm değildir. Bu makalede, eğer yörünge bazı şartları sağlayacak şekilde seçilirse manipülatörün tekil konumlardan stabil bir şekilde geçebileceği gösterilmektedir. Ayrıca tekil konumların civarında gereken tahrik kuvvetlerini hesaplayabilmek için dinamik denklemler daha yüksek türev bilgileri kullanılarak değiştirilmektedir.*

*Anahtar kelimeler: Paralel manipülatör, ters dinamik, tekil konumlar, tahrik tekil konumları*

## 1. GİRİŞ

Kapalı zincir yapısından dolayı paralel manipülatörler daha yüksek rijitlik/ağırlık oranına sahiptir. Ayrıca, sadece bazı mafsallar tahrik edildiği için tahrik elemanlarının yere yakın yerleştirilebilmesi verimliliği arttırmaktadır. [1,2]

Diğer taraftan, kapalı zincir yapısı özel dejenerasyon konumlarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu konumlar tahrik elemanlarının manipülatörün hareketini bazı yönlerde kontrol etme yeteneğini yitirdikleri *tahrik tekil konumları*'dır. Bu tip tekil konumlar ile ilgili olarak daha önce yapılmış olan çalışmaların çoğu bu konumlardan kaçınmak amacı ile bunların yerlerini belirlemeye yönelik olmuştur [3-8]. Halbuki tahrik tekil konumları ulaşım alanının iç kısımlarında yer almaktadır ve dolayısı ile bunlardan kaçınmak manipülatörün hareket edebileceği bölgeyi kısıtlar. Tahrik tekil konumlarının, seri robotların kooperasyon içinde çalışmaları durumunda da olduğu ve bu çerçevede kullanılacak bazı kontrol yöntemleri referans [9]'da gösterilmiştir.

Bu makalede paralel manipülatörlerin tahrik tekil konumlarından stabil ve hatasız bir şekilde geçebilmelerini sağlayacak şartların ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bunun için yörünge, dinamik denklemlerin gerektirdiği bazı özel şartları sağlaması gerektiği gösterilmektedir. Ayrıca, dejenerasyon olan dinamik denklemlerden kontrol kuvvetlerinin elde edilebilmesi için daha yüksek derecedeki türev bilgileri gözönüne alınarak bulunan yeni dinamik denklemler kullanılmaktadır. Dinamik

denklemlerin bu şekilde değiştirilmesi daha önce fazla mafsallı seri manipülatörlerin tahrik tekil konumları için geliştirilmiş olan değişikliklerin [10] bir benzeridir. Geliştirilen yöntem 3 serbestlik dereceli 2-RPR düzlemsel paralel manipülatörün simülasyonu yapılarak açıklanmaktadır. Bu yöntem ayrıca bir bildiride [11] 2 serbestlik dereceli 2-RRR manipülatörüne uygulanmıştır.

## 2. TERS DİNAMİK DENKLEMLERİ VE TAHİRİK TEKİL KONUMLARI

Serbestlik derecesi  $n$  olan bir paralel robot, tahrik edilmeyen mafsallarından yeteri kadarı açılarak bir açık sisteme dönüştürüldüğünde açık sistemin serbestlik derecesi  $m$  ise, bağımsız kapalı zincir şartlarının sayısı  $m-n$ 'dir. Açık sistemin mafsal değişkenleri vektörü  $\eta = [\eta_1, \dots, \eta_m]^T$  olarak yazılabilir. Bu değişkenlerden  $n$  adedi tahrik edilen mafsalların değişkenleridir. Açılan mafsallar tekrar kapatıldığında oluşan kapalı zincir şartları

$$\phi_i(\eta_1, \dots, \eta_m) = 0 \quad i = 1, \dots, m - n \quad (1a)$$

olarak yazılabilir. Robotun uç elemanının Kartezyen değişkenlerinin belirlenmiş fonksiyonları,  $x_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, n$  robotun görevlerini ifade eder. Bundan dolayı mafsal değişkenleri arasındaki bağıntılar

$$f_i(\eta_1, \dots, \eta_m) = x_i \quad i = 1, \dots, n \quad (1b)$$

şeklinde yazılabilir. Kapalı zincir şartları ve görev şartları hız seviyesinde beraberce aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Gamma \dot{\eta} = \mathbf{h} \quad (2)$$

Burada,  $\Gamma^T = \begin{bmatrix} \Gamma^{K^T} & \Gamma^{G^T} \end{bmatrix}$  ( $m \times m$  matris),

$$\Gamma_{ij}^K = \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta_j}, \quad i = 1, \dots, m-n, \quad j = 1, \dots, m,$$

$$\Gamma_{ij}^G = \frac{\partial f_i}{\partial \eta_j}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \quad \text{ve}$$

$\mathbf{h}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \dot{\mathbf{x}}^T \end{bmatrix}$  dir. Denklem (2)'nin türevi ivme seviyesindeki şartları verir:

$$\Gamma \ddot{\eta} = -\dot{\Gamma} \dot{\eta} + \dot{\mathbf{h}} \quad (3)$$

Paralel manipülatörün dinamik denklemleri

$$\mathbf{M} \ddot{\eta} - \Gamma^{K^T} \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{Z}^T \mathbf{T} = \mathbf{R} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerde  $\mathbf{M}$  açık sistemin  $m \times m$  genelleştirilmiş kütle matrisini,  $\mathbf{R}$  genelleştirilmiş Coriolis, merkezkaç ve ağırlık vektörünü,  $\boldsymbol{\lambda}$  zincir kapatılan mafsallardaki mafsal kuvvetleri vektörünü,  $\mathbf{T}$  tahrik kuvvetleri vektörünü, ve  $n \times m$  boyutlu  $\mathbf{Z}$  matrisinin her sırası bir tahrik kuvvetinin genelleştirilmiş uzaydaki yönünü göstermektedir. Eğer  $i$ 'inci tahrik kuvvetinin bulunduğu mafsalin değişkeni  $\eta_k$  ise  $\mathbf{Z}$ 'nin  $i$ 'inci sırası,  $Z_{ik} = 1$  and  $Z_{ij} = 0$  for  $j = 1, \dots, m (j \neq k)$  olur.

Denklem (4) bilinmeyen kuvvetler olan  $\boldsymbol{\lambda}$  ve  $\mathbf{T}$ 'yi çözmek üzere aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\mathbf{A}^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{M} \ddot{\eta} - \mathbf{R} \quad (5)$$

Burada  $\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} \Gamma^{K^T} & \mathbf{Z}^T \end{bmatrix}$  ( $m \times m$  matris) ve

$$\boldsymbol{\mu}^T = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}^T & \mathbf{T}^T \end{bmatrix} \text{ (} m \text{ boyutlu vektör)'} \text{dür.}$$

Sistemin ters dinamik çözümü için önce kinematik denklemler (1)-(3)'den  $\eta$ ,  $\dot{\eta}$  ve  $\ddot{\eta}$  bulunur, daha sonra denklem (5)'den  $\boldsymbol{\mu}$  (dolayısı ile tahrik kuvvetleri vektörü  $\mathbf{T}$ ) elde edilir.

Ancak ters kinematik çözüm sırasında  $|\Gamma| = 0$  olan konumlar, kinematik denklemlerin dejenere olduğu, çözüm olmayan *ters kinematik tekil*

*konumları* olmaktadır. Bu konumlarda istenilen  $\dot{\mathbf{x}}$  ve  $\ddot{\mathbf{x}}$  manipulator tarafından genelde elde edilemez, çünkü denklem (2)'de görüldüğü gibi  $\Gamma$ 'in kolonlarının kapsadığı vektör uzayının dışında yer alan bir  $\mathbf{h}$  vektörü elde edilemez ve dolayısı ile manipulator bir ya da daha fazla serbestlik derecesi kaybeder.

Dinamik denklemlerin tahrik kuvvetleri için çözümünü sırasında ise  $|\mathbf{A}| = 0$  olduğu başka bir tip tekil konumlar söz konusu olmaktadır. Bu tekil konumların yerleri  $\mathbf{Z}$  matrisine bağımlı olduğu için tahrik edilen mafsallar değiştiği takdirde farklı olmaktadır. Bu tip dejenerasyon, sistemin tahrik edilebilip edilememesi özelliği ile ilgili olduğundan bu konumlara *tahrik tekil konumları* denilecektir. Tahrik tekil konumlarında, istenilen  $\ddot{\eta}$ , tahrik elemanları tarafından genel olarak gerçekleştirilemez, çünkü denklem (5)'de görüldüğü gibi  $\mathbf{A}^T$ 'un kolonlarının kapsadığı uzayın dışında yer alan bir  $\mathbf{M} \ddot{\eta} - \mathbf{R}$  vektörü elde edilemez, yani tahrik elemanları uç elemanına bazı yönlerde istenen ivmeleri veremezler ve dolayısı ile tahrik elemanları bir ya da daha fazla serbestlik derecesinin kontrolünü kaybeder. (Sistem, tahrik üniteleri kilitlense bile uç elemanına bu yönlerde gelen kuvvetleri taşıyamaz.)

$\Gamma^K$  matrisinin tahrik edilmeyen mafsalların değişkenlerine karşılık gelen kolonlarından oluşan  $(m-n) \times (m-n)$  boyutlu matris  $\Gamma^{K*}$  olarak adlandırılırsa,  $Z_{ik} = 1$  ve  $Z_{ij} = 0 (j \neq k)$  olduğu için tahrik tekilliği şartı,  $|\mathbf{A}| = 0$  yerine eşdeğer olarak  $|\Gamma^{K*}| = 0$  olarak da yazılabilir.

### 3. TAHİRİK TEKİL KONUMLARI İÇİN GEREKEN BAĞDAŞMA ŞARTLARI

Yörünge planlaması aşamasında tekil konumlardan kaçınmak mümkündür. Tekil konumlardan kaçınmak ters kinematik tekil konumları için kolayca mümkündür çünkü ters kinematik tekil konumları genellikle manipülatörün erişim alanının kenarlarında oluşmaktadır [7]. Bu makalede  $\Gamma$ 'in rankının her zaman tam boyuta eşit olduğu yani sistemin hiçbir zaman bir ters kinematik tekil konuma gelmeyeceği kabul edilmiştir. Diğer taraftan tahrik tekil konumları erişim alanının iç kısımlarında yer aldığından bu konumlardan kaçınmak çalışma bölgesinin önemli ölçüde kısıtlanmasına sebep olur. Bu yüzden kontrol kuvvetleri stabil kalacak şekilde manipülatörün bu konumlardan geçmesini sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesi önemlidir. Bu amaç için tekil konumda (5) dinamik denkleminin oluşturduğu denklemlerin birbirleri ile bağdaşan denklemler olması gereksinimi

vardır, yani  $\mathbf{A}^T$ 'un satır vektörleri arasında yer alan ilişkinin sağ taraf vektörü olan  $\mathbf{M}\ddot{\eta} - \mathbf{R}$ 'de de olması gerekir ki bu vektör  $\mathbf{A}^T$ 'un kolonlarının kapsadığı uzayda yer alsın.

Bir tahrik tekil konumunda  $\mathbf{A}$ 'nın rankı genellikle  $m-1$  olur. Bu yüzden gereken bağdaşma şartları bu makalede rankın  $m-1$  olması durumu için çıkarılacaktır. Tahrik tekil konumunda  $\mathbf{A}^T$ 'un  $s$  satırının diğer satırların lineer kombinasyonu olduğu düşünülürse

$$\begin{aligned} A_{sj}^T &= \alpha_p A_{pj}^T & p &= 1, \dots, m & (p \neq s), \\ j &= 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\alpha_p$  lineer kombinasyon katsayılarıdır. (Denklemlerde toplama işareti gösterilmemiştir. Bir terimde tekrar edilen indisler menzilleri boyunca toplama olduğunu gösterir.) Bu durumda matris denklemi (5)'deki denklemler dizisinin birbirleri ile bağdaşan denklemler olması için aralarında olması gereken ilişki aşağıdaki gibidir.

$$A_{sj}^T \mu_j - \alpha_p A_{pj}^T \mu_j = M_{sj} \ddot{\eta}_j - R_s - \alpha_p (M_{pj} \ddot{\eta}_j - R_p) \quad (7)$$

Denklem (6) gözönüne alındığında denklem (7) aşağıdaki duruma gelir.

$$M_{sj} \ddot{\eta}_j - R_s = \alpha_p (M_{pj} \ddot{\eta}_j - R_p) \quad (8)$$

Denklem (8), tekil konumda  $\ddot{\eta}_j$  tarafından sağlanması gereken *bağdaşma şartı*'dır.  $\ddot{\eta}_j$ , ters kinematik çözümü ile denklem (3)'den elde edildiği için  $\ddot{\mathbf{x}}$  yörüngesinin denklem (8)'i sağlayacak şekilde planlanması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

#### 4. DİNAMİK DENKLEMLERİN DEĞİŞTİRİLMESİ

Bağdaşma şartları sağlansa bile tekil konumların civarında  $|\mathbf{A}| \cong 0$  olduğu için denklem (5)'den  $\mu$  doğru olarak hesaplanamamaktadır. Bu yüzden dinamik denklemlerin türevi gözönüne alınacaktır. Denklem (7)'nin türevi alındığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} (A_{sj}^T - \alpha_p A_{pj}^T) \dot{\mu}_j + \\ (\dot{A}_{sj}^T - \alpha_p \dot{A}_{pj}^T - \dot{\alpha}_p A_{pj}^T) \mu_j = (M_{sj} - \alpha_p M_{pj}) \ddot{\eta}_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + (\dot{M}_{sj} - \alpha_p \dot{M}_{pj} - \dot{\alpha}_p M_{pj}) \dot{\eta}_j \\ - \dot{R}_s + \alpha_p \dot{R}_p + \dot{\alpha}_p R_p \end{aligned} \quad (9)$$

Denklem (9)'daki  $\dot{\mu}_j$ 'lerin katsayıları tekil konumda denklem (5)'den dolayı sıfıra eşit olduğu için  $\dot{\mu}_j$ 'li terim, tekil konuma belli bir yakınlıkta diğer terimlere göre ihmal edilebilir seviyededir. Bu terimin atılması ile tekil konum civarında geçerli olmak üzere aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} (\dot{A}_{sj}^T - \alpha_p \dot{A}_{pj}^T - \dot{\alpha}_p A_{pj}^T) \mu_j = (M_{sj} - \alpha_p M_{pj}) \ddot{\eta}_j + (\dot{M}_{sj} - \alpha_p \dot{M}_{pj} \\ - \dot{\alpha}_p M_{pj}) \dot{\eta}_j - \dot{R}_s + \alpha_p \dot{R}_p + \dot{\alpha}_p R_p \end{aligned} \quad (10)$$

Denklem (10), matris denklemi (5)'in  $s$  satırının yerine kullanılabilir *değiştirilmiş dinamik denklem* olup bilinmeyen kuvvetleri  $\ddot{\eta}_j$ 'lere ilişkilendirmektedir.

Denklem (5)'in  $s$  satırının denklem (10) ile değiştirilmesi ile tahrik kuvvetlerini bulmak üzere aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\mathbf{D}^T \boldsymbol{\mu} = \mathbf{S} \quad (11)$$

Buradaki  $\mathbf{D}$  ve  $\mathbf{S}$  şu şekildedir:

$$\begin{aligned} D_{ij}^T = \begin{cases} A_{ij}^T & i \neq s \\ \dot{A}_{ij}^T - \alpha_p \dot{A}_{pj}^T - \dot{\alpha}_p A_{pj}^T & i = s \end{cases} \quad (12) \\ \text{ve} \\ S_i = \begin{cases} M_{ij} \ddot{\eta}_j - R_i & i \neq s \\ (M_{ij} - \alpha_p M_{pj}) \ddot{\eta}_j + (\dot{M}_{ij} - \alpha_p \dot{M}_{pj} - \dot{\alpha}_p M_{pj}) \dot{\eta}_j \\ - \dot{R}_i + \alpha_p \dot{R}_p + \dot{\alpha}_p R_p & i = s \end{cases} \quad (13) \end{aligned}$$

Paralel manipulatörlerin *ters dinamik algoritması* aşağıda verilmiştir:

1. Paralel manipulatörün tahrik tekil konumlarını ve bu konumlardaki lineer bağımlılık katsayılarını bulunuz.

2. Eğer uç elemanı tahrik tekil konumlarından geçiyorsa uç elemanının yörüngesini tekil konumlardaki bağdaşma şartlarını sağlayacak şekilde seçiniz.

3. Zaman:  $t = 0$ .

4. Kinematik denklemlerden  $\eta$ ,  $\dot{\eta}$  ve  $\ddot{\eta}$ 'yi nümerik olarak bulunuz.

5.  $g(\eta_1, \dots, \eta_m) = 0$ ,  $|A| = 0$ 'dan elde edilen tekil olma şartı ve  $\epsilon$  belirlenmiş bir küçük pozitif sayı olsun. Eğer manipulator bir tekil konumun civarında ise, yani  $|g(\eta_1, \dots, \eta_m)| < \epsilon$  ise,  $\mu$ 'yu, denklem (3)'ün türevinden  $\ddot{\eta}$ 'yi bulduktan sonra, denklem (11)'den bulunuz.

6. Eğer manipulator bir tekil konumun civarında değil ise, yani  $|g(\eta_1, \dots, \eta_m)| > \epsilon$  ise,  $\mu$ 'yu denklem (5)'den bulunuz.

7.  $t = t + \Delta t$ . Son zamana gelindi ise durunuz. Aksi halde 4 basamağına gidiniz.

## 5. ÖRNEK

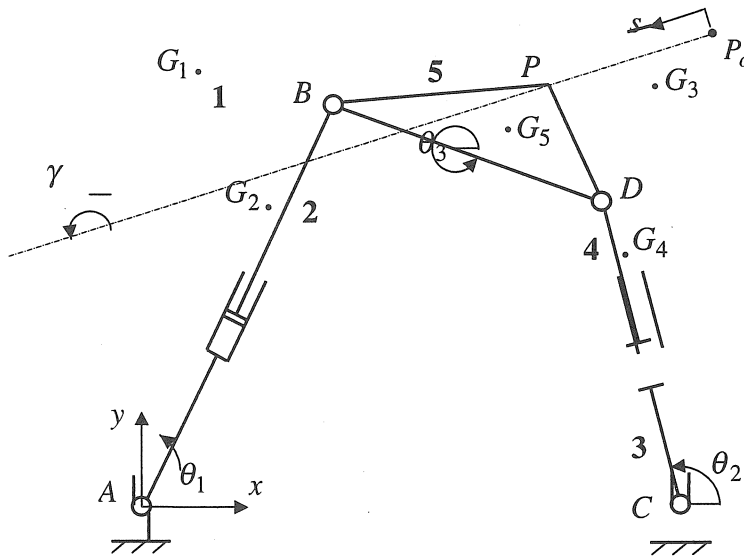
Şekil 1'de görülen 2-RPR düzlemsel paralel manipulatorün serbestlik derecesi 3'tür ( $n = 3$ ). Sistem A'daki döner mafsaldan tahrik edilmektedir. D noktasındaki döner mafsaldan açılması düşünülerek elde edilen açık sistemin mafsaldan değişkenleri vektörü

$$\eta = [\theta_1 \quad \zeta_1 \quad \theta_2 \quad \zeta_2 \quad \theta_3]^T \quad \text{olmaktadır.}$$

Burada  $\zeta_1 = AB$  ve  $\zeta_2 = CD$ 'dir. P noktası operasyon noktası olduğundan hareketli platformun pozisyon ve açısal konum vektörü  $x = [x_P \quad y_P \quad \theta_3]^T$  olmaktadır. Tahrik kuvvetleri vektörü  $T = [T_1 \quad F_1 \quad F_2]^T$  sırasıyla A'daki motor kuvveti ile  $\zeta_1$  ve  $\zeta_2$ 'ye karşılık gelen doğrusal tahrik elemanı kuvvetlerinden oluşmaktadır.

Görev şartlarının hız seviyesindeki  $\Gamma^G \dot{\theta} = \dot{x}$  denklemindeki  $\Gamma^G$  aşağıda verilmiştir.

$$\Gamma^G = \begin{bmatrix} -\zeta_1 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 & -c \sin(\theta_3 + \alpha) \\ \zeta_1 \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 & c \cos(\theta_3 + \alpha) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$



Şekil 1. 2-RPR düzlemsel paralel manipulator



Sistemin kütle matrisi  $M$  ile Coriolis, merkezkaç ve ağırlık vektörü  $R$  şu şekildedir:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 & 0 & M_{15} \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 & M_{25} \\ 0 & 0 & M_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} & 0 \\ M_{51} & M_{52} & 0 & 0 & M_{55} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{bmatrix}$$

Burada

$$M_{11} = m_1 g_1^2 + I_1 + m_2 (\zeta_1 - g_2)^2 + I_2 + m_5 \zeta_1^2,$$

$$M_{15} = m_5 \zeta_1 g_5 \cos(\theta_1 - \theta_3 - \beta),$$

$$M_{22} = m_2 + m_3,$$

$$M_{25} = m_5 g_5 \sin(\theta_1 - \theta_3 - \beta),$$

$$M_{33} = m_3 g_3^2 + I_3 + m_4 (\zeta_2 - g_4)^2 + I_4,$$

$$M_{44} = m_4, \quad M_{51} = m_5 \zeta_1 g_5 \cos(\theta_1 - \theta_3 - \beta),$$

$$M_{52} = m_5 g_5 \sin(\theta_1 - \theta_3 - \beta),$$

$$M_{55} = m_5 g_5^2 + I_5,$$

$$R_1 = 2 m_2 (\zeta_1 - g_2) \dot{\zeta}_1 \dot{\theta}_1 + m_5 \zeta_1 g_5 \dot{\theta}_3^2 \sin(\theta_1 - \theta_3 - \beta) + [m_1 g_1 + m_2 (\zeta_1 - g_2) + m_5 \zeta_1] g \cos \theta_1,$$

$$R_2 = -m_5 g_5 \dot{\theta}_3^2 \cos(\theta_1 - \theta_3 - \beta) - m_2 (\zeta_1 - g_2) \dot{\theta}_1^2 - m_5 \zeta_1 \dot{\theta}_1^2 + (m_2 + m_5) g \sin \theta_1$$

$$R_3 = 2 m_4 (\zeta_2 - g_4) \dot{\zeta}_2 \dot{\theta}_2 + [m_3 g_3 + m_4 (\zeta_2 - g_4)] g \cos \theta_2$$

$$R_4 = m_4 (g_4 - \zeta_2) \dot{\theta}_2^2 + m_4 g \sin \theta_2,$$

$$R_5 = m_5 g_5 [2 \dot{\zeta}_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_3 - \beta) - \dot{\zeta}_1 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_3 - \beta) + g \cos(\theta_3 + \beta)]$$

Tahrik edilen mafsalların değişkenleri  $\theta_1$ ,  $\zeta_1$  ve  $\zeta_2$  olduğuna göre tahrik yön matrisi,

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

olmaktadır.  $A^T$  ise şu şekildedir:

$$A^T = \begin{bmatrix} -\zeta_1 \sin \theta_1 & \zeta_1 \cos \theta_1 & 1 & 0 & 0 \\ \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 1 & 0 \\ \zeta_2 \sin \theta_2 & -\zeta_2 \cos \theta_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 & 1 \\ -b \sin \theta_3 & b \cos \theta_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$|A| = b \zeta_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)$  olduğundan tahrik tekil konumları  $\zeta_2 = 0$  veya  $\sin(\theta_2 - \theta_3) = 0$  olan konumlardır. Pratikte  $\zeta_2$ 'nin sıfır olamayacağı düşünüldüğünde manipülörün tahrik tekil konumları  $\theta_2 - \theta_3 = \pm n \pi$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) olan konumlar, yani B, D ve C noktalarının aynı doğru üzerine geldiği konumlardır. (Burada  $g(\eta_1, \dots, \eta_m) = \theta_2 - \theta_3 \mp n \pi$ 'dir.) Görüldüğü gibi tahrik tekil konumları erişim alanının iç kısımlarında oluşmaktadır. Bu konumlardan kaçınmak için D noktasının BC doğrusunun sadece bir tarafında kalacağı bir çalışma bölgesi ile hareketi kısıtlamak gerekirdi. Bir başka deyişle erişim alanının tümünün kullanılabilmesi için manipülörün tahrik tekil konumlarından geçmesi gerekmektedir.

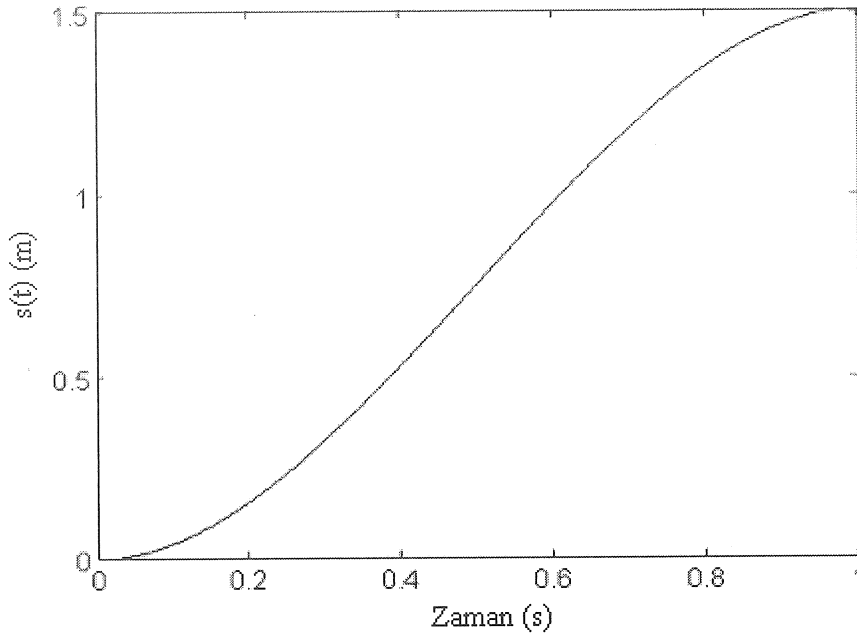
P noktası  $s = L_d = 0.662 \text{ m}$ 'ye geldiğinde manipülör,  $\theta_2 = \theta_3 + \pi$  olduğu tekil konuma gelmektedir. Bu pozisyonda  $A^T$ 'un üçüncü satırı beşinci satırın  $\frac{\zeta_2}{b}$  katına eşit olur. Sistemin genelleştirilmiş ivmelerinin sağlanması gereken bağdaşma şartı denklem (8)'den aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M_{33} \ddot{\theta}_2 - \frac{\zeta_2}{b} (M_{51} \ddot{\theta}_1 + M_{52} \ddot{\zeta}_1 + M_{55} \ddot{\theta}_3) = R_3 - \frac{\zeta_2}{b} R_5 \quad (20)$$

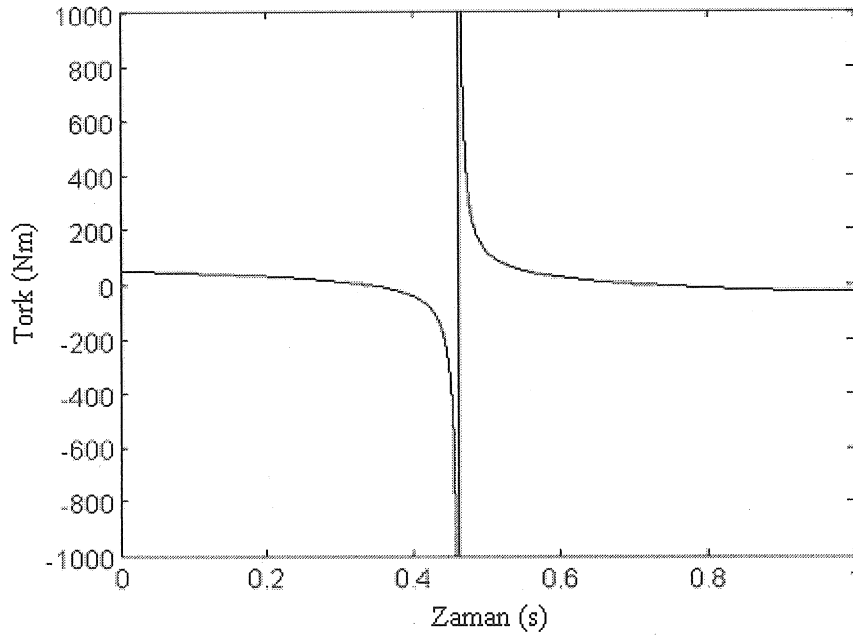
Bir tahrik tekil konumundan geçerken bağdaşma şartını sağlamıyan bir yörünge gerçeğe geçirilebilmesi mümkün olmamaktadır. Örnek olarak zaman fonksiyonu,  $s(t)$  için ilk ve son hızları sıfır olan üçüncü dereceden bir polinom, yani

$s(t) = \frac{3Lt^2}{T^2} - \frac{2Lt^3}{T^3}$  alınmıştır (Şekil 2). Tekil konuma  $t = 0.46$  s 'de ulaşılmaktadır. Şekil 3 ve Şekil 4'de görüldüğü gibi gereken tahrik kuvvetleri

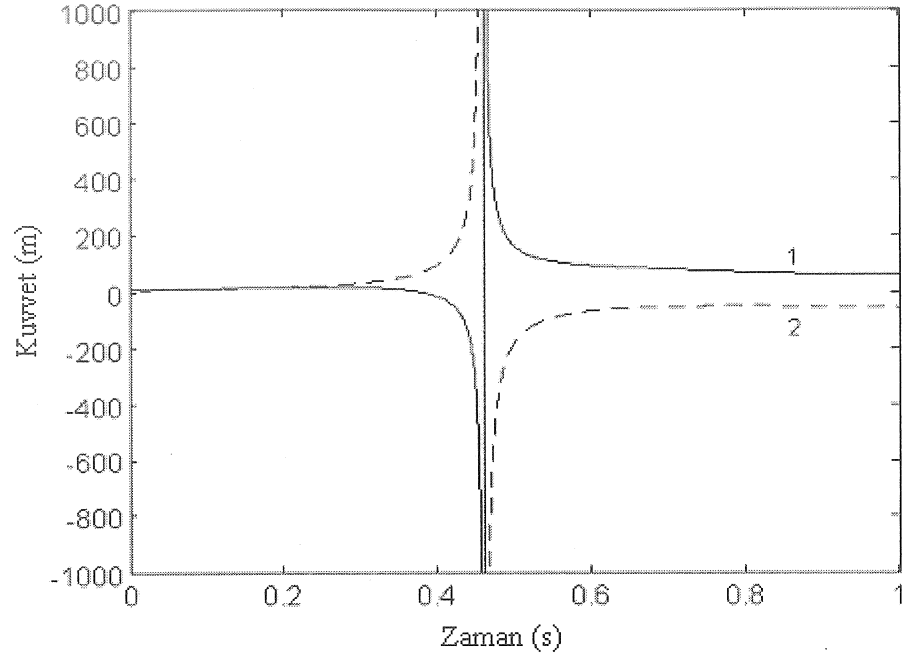
tekil konuma yaklaştıkça artmakta, tekil konumda ise sonsuza gitmektedir. (Şekillerde tekil konuma yakın yerlerde kuvvetler ölçek dışında kalmaktadır.)



Şekil 2. Bağdaşma şartını sağlamayan  $s(t)$



Şekil 3. Bağdaşma şartını sağlamayan yörünge için motor torku,  $T_1$



Şekil 4. Bağdaşma şartını sağlamayan yörünge için doğrusal tahrik kuvvetleri.

1.  $F_1$ , 2.  $F_2$

Zaman fonksiyonu  $s(t)$  için ilk ve son hızların sıfır olmasının yanısıra bağdaşma şartını da sağlayan bir polinom seçilecektir. Bunun için tekil konuma gelme zamanı,  $T_d$ , ve P noktasının bu andaki hızı,  $v_P(T_d)$  serbestçe seçilebilir. İvme düzeyindeki kapalı zincir şartları, platformun bilinen açısal ivmesi ( $\ddot{\theta}_3 = 0$ ), P noktasının ivmesinin bilinen yönü ( $\gamma = 200^\circ$ ) ve bağdaşma şartı olan denklem (20), genelleştirilmiş ivmelerin tekil konumdaki değerlerini veren 5 denklemleri oluşturmaktadır. Böylece, tekil konumdaki  $\eta$  ve  $\dot{\eta}$  değerleri de kullanılarak P noktasının ivmesi,  $a_P(T_d)$  bulunmaktadır. Sonuç olarak  $s(0) = 0$ ,  $\dot{s}(0) = 0$ ,  $s(T) = L$ ,  $\dot{s}(T) = 0$ ,  $s(T_d) = L_d$ ,  $\dot{s}(T_d) = v_P(T_d)$  ve  $\ddot{s}(T_d) = a_P(T_d)$  şartlarını sağlayan altıncı dereceden bir polinom seçilmektedir.  $T_d$  ve  $v_P(T_d)$ ,  $s(t)$  fonksiyonunda lokal tepeler meydana gelmeyecek şekilde sına yanılma ile seçilmektedir. Kullanılan değerler  $T_d = 0.62s$  ve  $v_P(T_d) = 1.7 m/s$ 'dir. Buradan

$a_P(T_d) = 10.6 m/s^2$  bulunmaktadır. Elde edilen  $s(t)$  fonksiyonu denklem (21)'de verilmiştir ve Şekil 5'de görülmektedir.

$$s(t) = 20.733t^2 - 87.818t^3 + 146.596t^4 - 103.669t^5 + 25.658t^6 \quad (21)$$

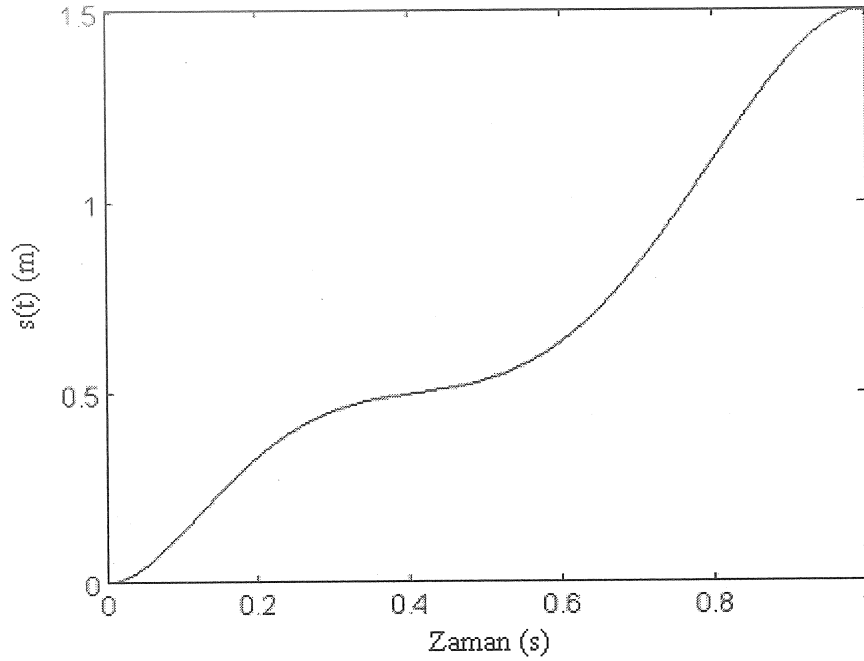
Tekil konumda bağımlı olan denklemin yerine kullanılmak üzere denklem (10)'dan elde edilen yeni denklem aşağıda verilmiştir.

$$B_j \tau_j = Q \quad j = 1, 2 \quad (22)$$

$$B_1 = \dot{A}_{31}^T - \frac{\zeta_2}{b} \dot{A}_{51}^T - \frac{\zeta_2}{b} A_{51}^T \quad (23a)$$

$$B_2 = \dot{A}_{32}^T - \frac{\zeta_2}{b} \dot{A}_{52}^T - \frac{\zeta_2}{b} A_{52}^T \quad (23b)$$

$$Q = M_{33}\ddot{\theta}_2 - \frac{\zeta_2}{b}(M_{51}\ddot{\theta}_1 + M_{52}\ddot{\zeta}_1 + M_{55}\ddot{\theta}_3) + \dot{M}_{33}\dot{\theta}_2 - \frac{\zeta_2}{b}(\dot{M}_{51}\dot{\theta}_1 + \dot{M}_{52}\dot{\zeta}_1 + \dot{M}_{55}\dot{\theta}_3) - \frac{\zeta_2}{b}(M_{51}\ddot{\theta}_1 + M_{52}\ddot{\zeta}_1 + M_{55}\ddot{\theta}_3) - \dot{R}_3 + \frac{\zeta_2}{b}\dot{R}_5 + \frac{\zeta_2}{b}R_5 \quad (23c)$$



Şekil 5. Bağdaşma şartını sağlayan  $s(t)$

Bu durumda denklem (11), denklem (5)'in üçüncü (ya da beşinci) satırının denklem (22) ile değiştirilmesi ile elde edilir. Böylece denklem (11)'deki  $D$  ve  $S$  şu şekli alır:

$$D_{ij}^T = \begin{cases} A_{ij}^T & i=1,2,4,5 \quad j=1,\dots,5 \\ B_j & i=3 \quad j=1,\dots,5 \end{cases}$$

$$S_i = \begin{cases} M_{ij} \ddot{\eta}_j - R_i & i=1,2,4,5 \\ Q & i=3 \end{cases} \quad (24)$$

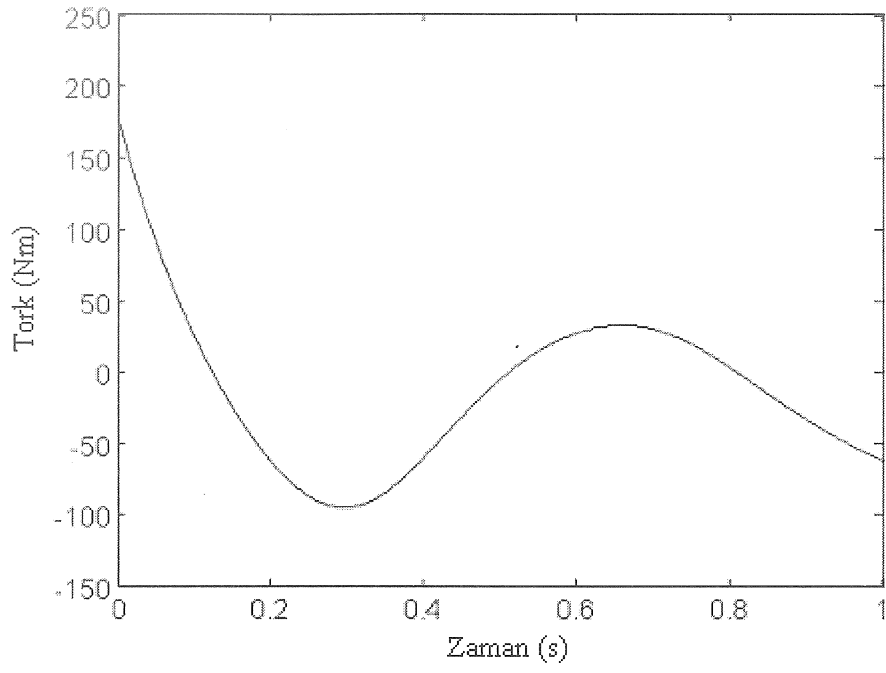
Yörünge, yukarıda açıklandığı gibi bağdaşma şartını sağlayacak şekilde seçildikten sonra ters kinematik çözümü yapılarak  $\eta$ ,  $\dot{\eta}$  ve  $\ddot{\eta}$  elde edilir. Tahrik kuvvetleri ( $D$  mafsalı kuvvetleri ile birlikte) tekil konumdan uzak bölgelerde denklem (5)'den, tekil konum civarında ise denklem (11)'den bulunur. Denklem (11)'in kullanıldığı tekil konum civar bölgesi  $|\theta_2 - \theta_3 + 180^\circ| < \varepsilon = 0.5^\circ$  olarak alınmıştır. Gereken tahrik kuvvetleri Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmektedir. Tekil konumdaki tahrik kuvvetleri  $T_1 = 30.31 \text{ Nm}$ ,  $F_1 = 26.37 \text{ N}$  and  $F_2 = 1.61 \text{ N}$  olarak bulunmuştur. Sistemin hareketi Şekil 8 ve Şekil 9'da görülmektedir. Değiştirilmiş denklemlerin test edilmesi amacı ile tekil konum

bölgesi  $\varepsilon = 1^\circ$  olarak alındığında çözümde önemli sayılabilecek bir görülmemiştir:

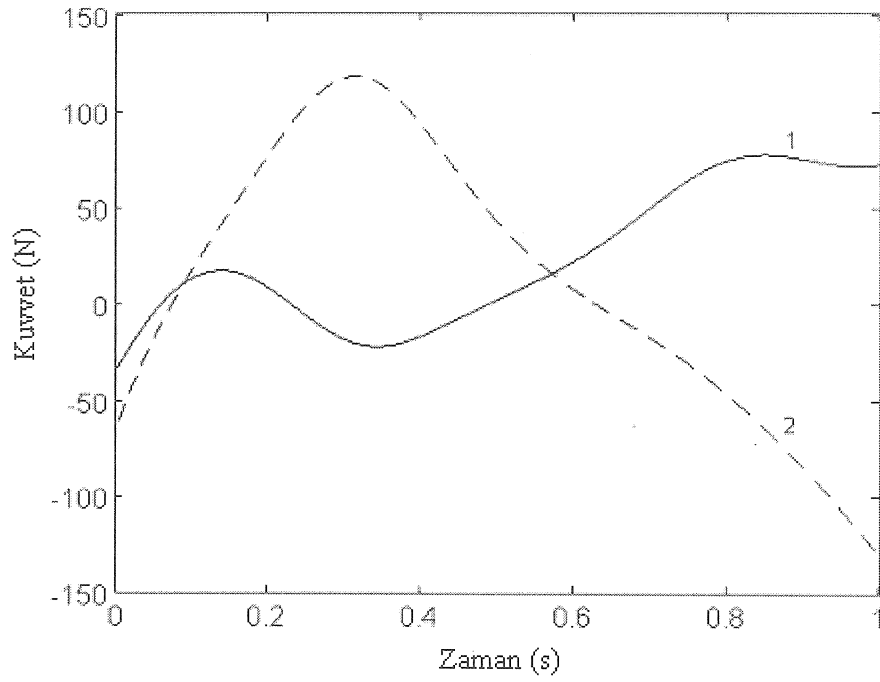
## 6. SONUÇ

Paralel manipulatörlerin, tahrik ünitelerinin uç elemanını bazı yönlerde kontrol edemediği tahrik tekil konumlarının bulunduğu yerlerde ters dinamik çözümü için genel bir yöntem geliştirilmiştir. Uç elemanının yörüngesinin dinamik denklemleri tekil konumda birbirleri ile bağdaşan denklemler yapacak şekilde seçilmesi halinde yörüngenin gerçekleştirilebileceği, aksi takdirde gerçekleştirilemeyeceği gösterilmiş ve gereken bağdaşma şartları çıkarılmıştır.

Ayrıca tekil konumlarda dejenere olan dinamik denklemlerden tahrik kuvvetlerini çözebilmek için bağımlı olan denklemin yerine kullanılmak üzere dinamik denklemlerin türevini almak suretiyle yeni bir denklem elde edilmektedir. Bu yaklaşım ile, bilinmeyen kuvvetlerin katsayı matrisinin rankı tam boyuta yükseltilerek çözüm yapılmaktadır. Bu makalede önerilen yöntemlerle paralel manipulatörlerde gereken tahrik kuvvetlerinin zamana göre değişimleri tekil konumların civarında bile elde edilmektedir.

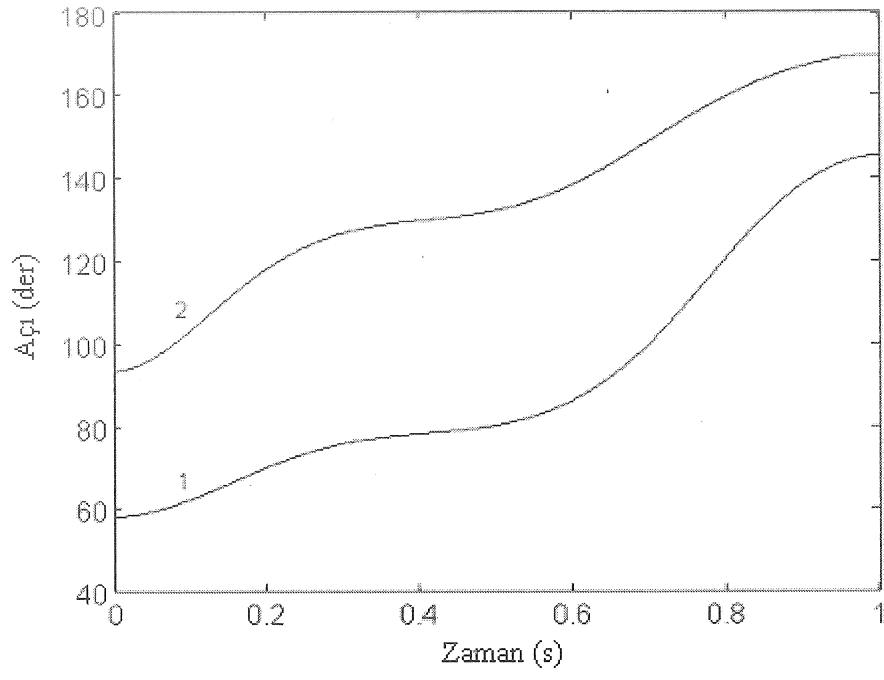


Şekil 6. Bağıdaşma şartını sağlayan yörünge için motor torku,  $T_1$

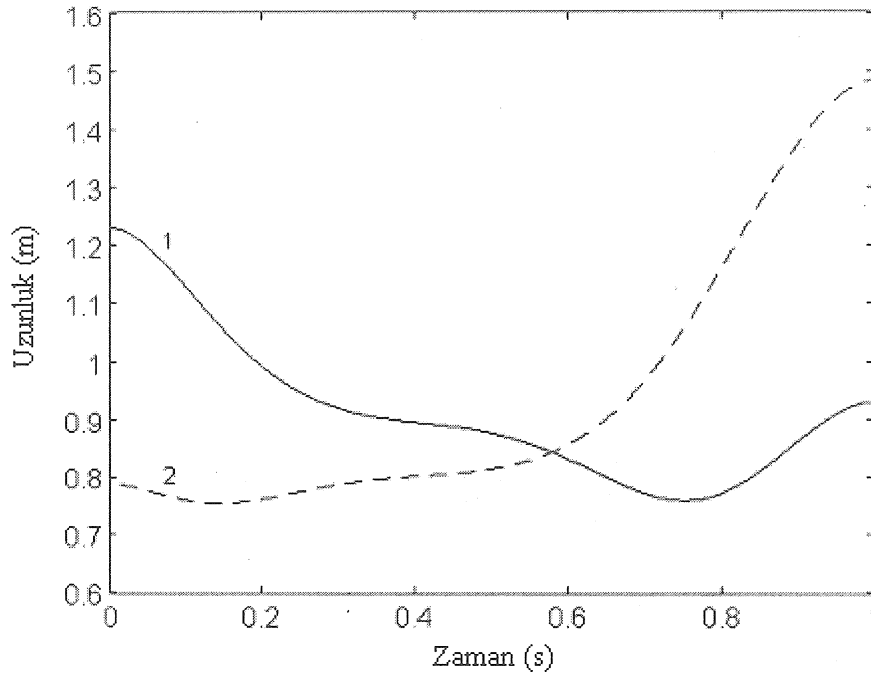


Şekil 7. Bağıdaşma şartını sağlayan yörünge için doğrusal tahrik kuvvetleri.  
1.  $F_1$ , 2.  $F_2$





Şekil 8. Döner mafsalsal hareketleri. 1.  $\theta_1$ , 2.  $\theta_2$



Şekil 9. Doğrusal mafsalsal hareketleri. 1.  $\zeta_1$ , 2.  $\zeta_2$

## MOTION OF PARALLEL MANIPULATORS AT DRIVE SINGULAR POSITIONS

There are certain positions of parallel manipulators, called drive singularities, where the actuators lose control of the end-effector in certain directions. At such positions the required actuator forces grow without bounds. Avoiding the drive singular positions is usually not desirable because it limits the utilization of the workspace. It is shown that if the trajectory is planned to satisfy certain consistency conditions the manipulator can pass through the singular positions in a stable fashion. Furthermore the dynamic equations are modified in the neighborhood of the drive singularities. A deployment motion of a 3 dof planar manipulator is analysed to illustrate the proposed approach.

Keywords: Parallel manipulator, inverse dynamics, singularity, drive singularity

### REFERENCES

1. Gao F., Li W., Zhao X., Jin Z., Zhao H., "New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs", *Mechanism and Machine Theory* **37**, 1395-1411 (2002).
2. Gunawardana R., Ghorbel F., "PD control of closed-chain mechanical systems: an experimental study", Proc. Of the Fifth IFAC Symposium on Robot Control SYROCO'97, Vol. 1, pp. 79-84, Nantes, France, September 1997.
3. Sefrioui J., Gosselin C. M., "On the quadratic nature of the singularity curves of planar three-degree-of-freedom parallel manipulators", *Mechanism and Machine Theory* **30**, 533-551 (1995).
4. Daniali H. R. M., Zsombor-Murray P. J., Angeles J., "Singularity analysis of planar parallel manipulators", *Mechanism and Machine Theory* **30**, 665-678 (1995).
5. Alici G., "Determination of singularity contours for five-bar planar parallel manipulators", *Robotica* **18**, 569-575 (2000).
6. Ji Z., "Study of planar three-degree-of-freedom 2-RRR parallel manipulators", *Mechanism and Machine Theory* **38**, 409-416 (2003).
7. Di Gregorio R., "Analytic formulation of the 6-3 fully-parallel manipulator's singularity determination", *Robotica* **19**, 663-667 (2001).
8. St-Onge B. M., Gosselin C., "Singularity analysis and representation of the general Gough-Stewart platform", *Int. Journal of Robotics Research* **19**, 271-288 (2000).
9. Özgören M. K., "Motion Control of Constrained Systems Considering their Actuation-Related Singular Configurations", *IMEchE Part I, Journal of Systems and Control Engineering* **215**, 113-123 (2001).
10. İder S. K., "Inverse Dynamics of Redundant Manipulators Using a Minimum Number of Control Forces", *Journal of Robotic Systems* **12**, 569-579 (1995).
11. İder S. K., "Actuation of Parallel Manipulators in the Presence of Drive Singularities", 11<sup>th</sup> International Conference on Machine Design and Production, 13-15 October 2004, Antalya, Turkey.

Hikmet Çalimli  
MSc.

Ostim Mesleki Eğitim Merkezi  
Ostim/ANKARA

Abdulkadir Güllü  
Yrd.Doç.Dr.

Makine Bölümü  
Teknik Eğitim Fakültesi  
Gazi Üniversitesi ANKARA

# Lepleme İşleminde İş Malzemesi Sertliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

*Bu çalışmada, bir çok alanda ihtiyaç duyulan iyi bir yüzey pürüzlülüğü elde etmek için iş malzemesi sertliğinin lepleme işlemine etkisi araştırılmıştır. İş malzemesi olarak AISI 8620 semantasyon çeliği seçilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler iki gruba ayrılmış, birinci grup suda sertleştirilmiş (40 HRC), ikinci grup malzemelere hiçbir ısı işlem yapılmamıştır (24 HRC). Bu malzemeler basınç ve süreye göre düzlem yüzey lepleme tezgahında leplenmiş, her işlem için yüzey pürüzlülükleri ölçülerek malzeme sertliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Lepleme işlemi sonunda sert malzemelerin yüzey pürüzlülüğünde önemli derecede iyileşme olduğu görülmüştür.*

*Anahtar Kelimeler: Lepleme İşlemi, Lepleme Süresi, Lepleme Basıncı, Yüzey Pürüzlülüğü, Sertlik*

## GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerle birlikte işlenen yüzey özelliklerinde iyileşme ve ölçü tamlığı konusunda beklentiler de artmaktadır. 1960'lara kadar yüzey kalitesi için ortalama pürüzlük değeri olarak 10 µm yeterli görülürken, 2000'li yıllarda istenilen yüzey kalitesi 100 nm'ye kadar düşmüştür. Teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte her alanda ölçü, biçim ve görünüş tamlığı isteği artmıştır. Teknolojinin ihtiyaç duyduğu parçaları istenilen düzeyde üretmek farklı araştırmalar yapılmasını gerektirmektedir [1,2].

Lepleme işlenmiş yüzeylerde, yüksek kalitede yüzey elde etmek amacıyla uygulanan bir talaş kaldırma işlemidir. Lepleme, dört ana amaç için yapılmaktadır:

- 1) Ölçü tamlığı sağlamak,
- 2) Daha iyi (parlak) yüzey elde etmek,
- 3) Yüzey tamlığını sağlamak (hatalı yüzeyleri düzeltmek)
- 4) Bir biri ile çalışan yüzeyler arasında uyumu sağlamak [3,4,5].

Lepleme çok yavaş bir işleme yöntemi olduğu için parametrelerin iyi bir şekilde tespiti gerekmektedir [6]. Ancak bu işlemi teorik olarak en iyi şekilde karakterize ederek yapmak çok zordur. Çünkü diğer yüzey işleme metotları gibi çok sayıda parametrenin etkilemesi, bu işlemi karmaşıktır [7]. Bu sebeple lepleme işlemi analiz etmek için deneysel araştırmalar yapılması gerekmektedir [8]. Diğer bitirme işlemlerine göre, lepleme işleminde iş parçasını manyetik ve diğer bağlama kalıpları ile tespit etmeye gerek duyulmaması, leplenmesi gereken iki yüzeyin aynı anda leplenebilmesi ve bu işlem sonucu parçalarda istenilen yüzey kalitesi, ölçü tamlığı ve paralellik sağlanması leplemenin avantajları olarak sayılabilir [9].

Yapılan araştırmalar sonucunda ülkemizde lepleme işlemi ile ilgili bir akademik araştırmaya rastlanmaması ve bundan sonra yapılacak olan araştırmalara temel oluşturması düşüncesiyle, bu çalışmada iş malzemesi sertliğinin yüzey kalitesine etkileri üzerinde durulmuştur.

## MALZEME VE METOD

Bu çalışmada makine imalat sanayinde geniş kullanım alanı olan AISI 8620 semantasyon çeliği kullanılmıştır [10]. Numunelerin kimyasal analizleri, Spektrometre cihazı ile KOSGEB Ankara Danışmanlık ve Kalite Geliştirme Merkezinde yapılmış ve Çizelge 1'de verilmiştir.

Çapı 26 mm, boyu 17 mm olan 72 adet numune kesilmiş ve numunelerin boyları tornalanarak 15 mm'ye düşürülmüştür. Bunların 36 adedi tav fırınında 950 °C sıcaklıkta 30 dakika bekletilerek suda sertleştirilmiş diğer numunelere ısı işlem yapılmamıştır. Daha sonra tüm numunelerin boyları 14 mm olacak şekilde taşlanmıştır.

Boyları 14 mm olan numunelerden 5'er adet seçilerek, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme Laboratuvarında sertlikleri ölçülmüştür. Her numune üzerinden üç ayrı bölgeden beşer ölçme yapılmış ve sertlik ölçüm değerlerinin aritmetik ortalaması grubun sertliği olarak kabul edilmiştir. Bu değerler AISI 8620 sertleştirilmiş numuneler için 40 HRC ve AISI 8620 sertleştirilmemiş numuneler için 24 HRC olarak ölçülmüştür.

Çizelge 1. AISI 8620 malzemesinin kimyasal bileşimi

ELEMENT	%	ELEMENT	%
Karbon (C)	0,2132	Alüminyum (Al)	0,0237
Bakır (Cu)	0,154	Molibden (Mo)	0,172
Demir (Fe)	97,20	Wolfram (W)	0,0802
Fosfat (P)	0,00431	Mangan (Mn )	0,758
Kükürt (S)	0,02041	Antimon (Sb)	0,0596
Krom (Cr)	0,513	Silisyum (Si)	0,309
Nikel (Ni)	0,474	Kobalt (Co)	0,0244
Kalay (Sn)	0,0121		

Deneylerin yapıldığı düzlem lepleme tezgahının üç ayrı haznesi olup her haznenin basıncı 0-758 kPa aralığında ayarlanabilmektedir. Basınç pnömatik olarak her pistonu ait bir manometre ile kontrol edilmektedir. Lepleme diski dökme demirden yapılmış olup devir sayısı 147,6 devir/dakikadadır. Lepleme işleminde aşındırıcı olarak SiC F 220 [11], lepleme sıvısı (yağı) olarak LAPPING BASE 6948 kullanılmıştır. Lepleme karışımı (aşındırıcı toz ve yağ) 1/4 olarak ayarlanmıştır [12]. Deneyler sırasında lepleme tezgahına ait tutucular kullanılmamış, iş parçalarının ölçü ve şekline uygun fiber malzemeden yeni tutucular yapılmıştır. Deney yapılmadan önce lepleme diski ve haznesi gaz yağı ile temizlenmiştir.

#### Deney Parametreleri ve Yapılışı

Yapılmış olan araştırmalarda, lepleme işleminde yüzey pürüzlülüğüne etki eden bir çok parametrenin olduğu görülmüştür. Bu parametreler; lepleme basıncı, titreşim hızı, aşındırıcının tane boyutu, lepleme süresi, lepleme disk hızı, leplenen malzemenin sertliği, karışım cinsi, karışım oranı, karışımın debisi ve lepleme karışımı kullanılıp kullanılmaması olarak sayılabilir [7,8]. Bu çalışmada, araştırma konusu olarak yukarıda sayılan lepleme parametrelerinden leplenen malzemenin sertliği ele alınmıştır.

Lepleme karışımının homojen olması için karışım mikserlenerek hazırlanmıştır. Karışımın debisi 66,6 ml/dak olarak ayarlanmıştır. Lepleme basıncı pnömatik bir sistemle sağlanmaktadır. Yapılan deney takip formuna göre birinci, ikinci ve üçüncü haznelerin basınçları sırayla 68.95, 206.85 ve 344.75 kPa basınca ayarlanmıştır. Bu basınçlarda numuneler sırasıyla 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dak sürelerde leplenmiştir. Hazneden alınan numuneler benzinle yıkanmış ve oksitlenmeyecek şekilde muhafaza edilmiştir. Daha sonra birinci, ikinci ve üçüncü hazne basınçları sırayla 482.65, 620.55 ve 689.5 kPa basınca ayarlanmış ve numuneler sırasıyla 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 dak süreyle leplenmiştir.

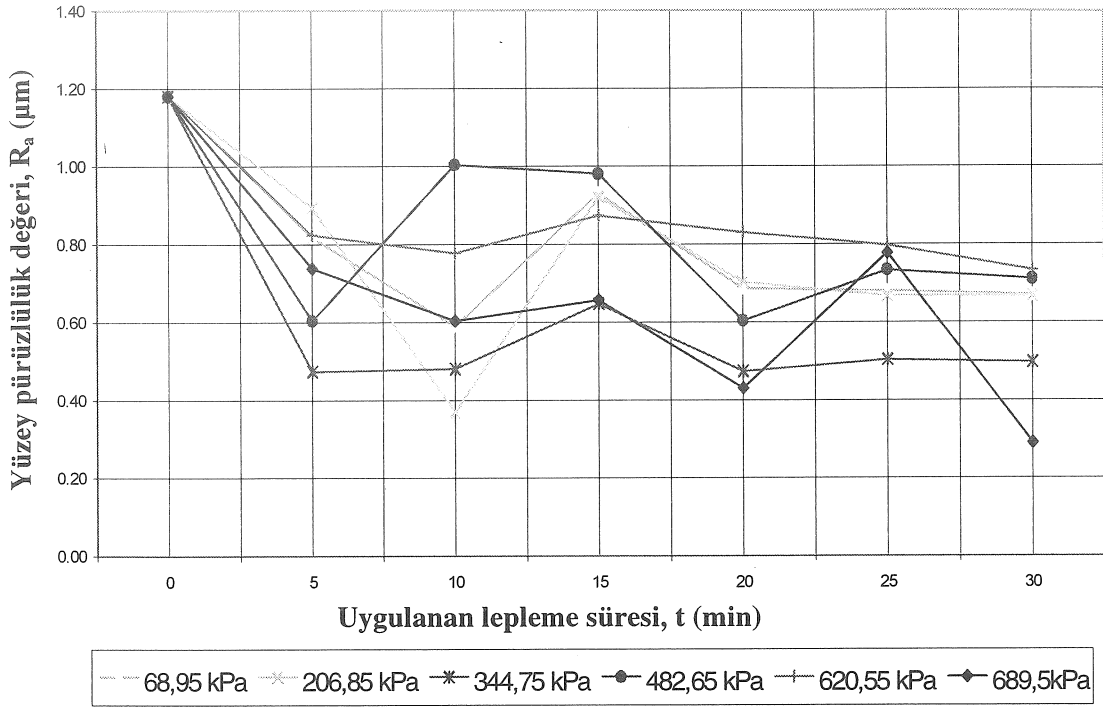
#### Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Leplenen numuneler, benzin dolu bir kaba ayrı ayrı daldırılmış ve basınçlı havayla temizlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü izleyici uçlu (stylus) cihazlar yöntemi kullanılarak [13] SurfTest-211 (Mitutoyo) pürüzlülük ölçme cihazıyla, ortam sıcaklığı  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  şartları sağlandıktan sonra yapılmıştır. Tüm numuneler üç ayrı bölgeden, dış kenardan içe doğru ölçülmüştür. Ölçülen bölgelerin  $R_a$ ,  $R_z$  ve  $R_t$  değerlerinin aritmetik ortalamaları alınmıştır.

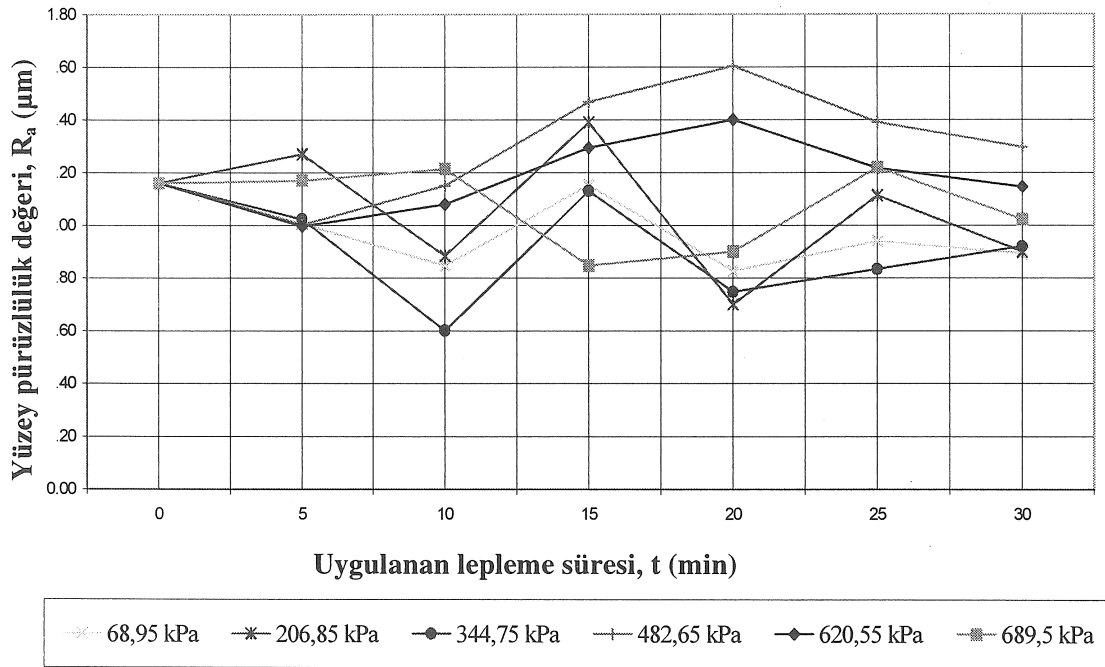
#### DENEYSEL BULGULAR

##### Leplenen Yüzeylerde Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Şekil 1 ve Şekil 2'de sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş numunelerin leplene sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri görülmektedir. Toplam 36 adet yüzey pürüzlülüğü değeri ölçülmüştür. Sertleştirilmemiş numunelerin ölçülen pürüzlülük değerlerinden 11 tanesinde başlangıç yüzey pürüzlülük değerine göre artma olmuştur. Sertleştirilmiş numunelerde ise başlangıç yüzey pürüzlülük değerine göre artma olmamıştır. Lepleme sonrası yüzey pürüzlülük değerleri, sertleştirilmemiş numunelerde 1,6-0,6  $\mu\text{m}$  arasında değişirken, sertleştirilmiş numunelerde 1-0,3  $\mu\text{m}$  olmuştur. Elde edilen en iyi değerlere göre iyileşme sertleştirilmemiş numunelerde % 49, sertleştirilmiş numunelerde yaklaşık %73 olmuştur. Bu sonucu Lamropulos ve arkadaşlarının çalışmaları desteklemektedir [14].



Şekil 1. Sertleştirilmiş AISI 8620 numunelerin lepleme süresi (t) ve  $R_a$  ilişkisi



Şekil 2. Sertleştirilmemiş AISI 8620 numunelerin lepleme süresi (t) ve  $R_a$  ilişkisi

### Yüzey Pürüzlülüklerinin ( $R_a$ ) Lepleme Sürelerine Göre Değişimi

Farklı basınçlarda lepleme sürelerine göre ölçülen pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalamaları Şekil 3' de verilmiştir. Sertleştirilmiş numunelerde süreye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde iyileşme olmuş, sertleştirilmemiş numunelerde ise bu iyileşme görülmemiştir. En iyi değerler sertleştirilmiş numunede 0,7  $\mu\text{m}$  sertleştirilmemiş numunede 0,9  $\mu\text{m}$  olmuştur. En kötü değer sertleştirilmiş numunede 0,95  $\mu\text{m}$ , sertleştirilmemiş numunede 1,21  $\mu\text{m}$  olmuştur.

### Yüzey Pürüzlülüklerinin ( $R_a$ ) Basınca Göre Değişimi

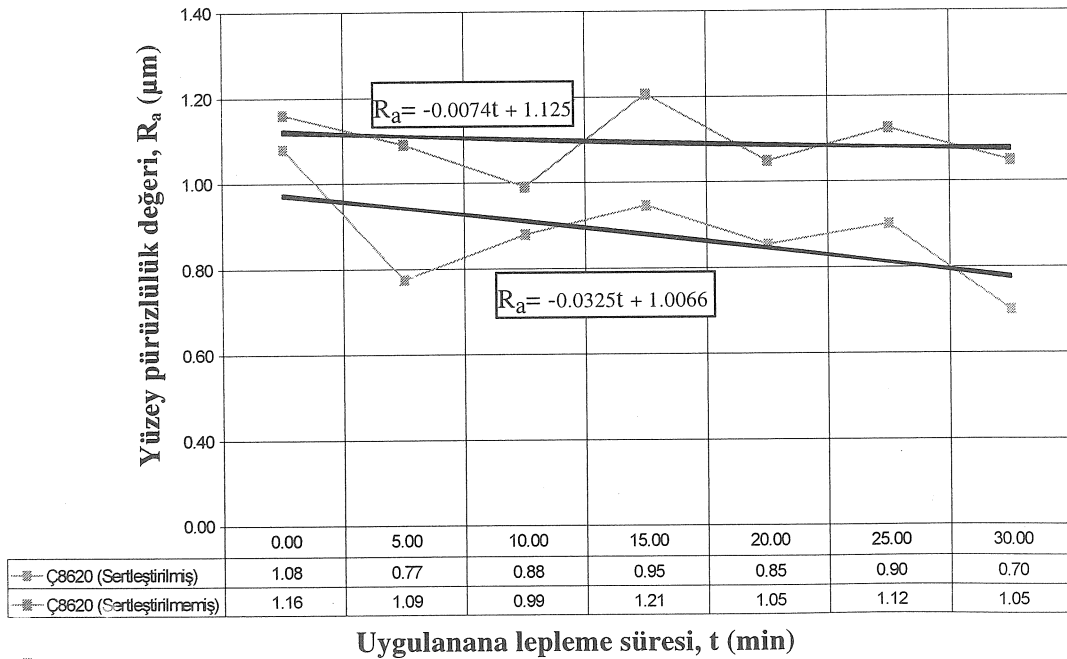
Farklı sürelerde lepleme basınçlarına göre ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalamaları alınmış ve Şekil 4'deki grafik elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde sertleştirilmiş numunelerde basınca bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde iyileşme olmuş, sertleştirilmemiş numunelerde ise kötüleşme oluşmuştur. En iyi pürüzlülük değerleri sertleştirilmiş numunede 0,63  $\mu\text{m}$ , sertleştirilmemiş numunede 0,92  $\mu\text{m}$  olmuştur. En kötü değer sertleştirilmiş numunede 0,86  $\mu\text{m}$ , sertleştirilmemiş numunede 1,3  $\mu\text{m}$  olmuştur.

### Sabit Basınçta (344,75 kPa) Farklı Lepleme Sürelerine Göre Yüzey Görüntüleri

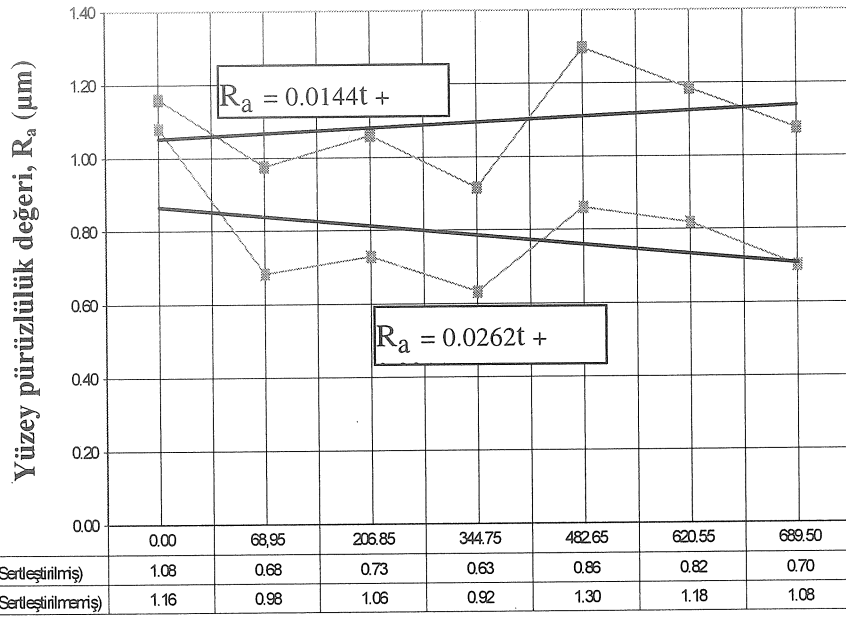
Şekil 5. ve Şekil 6'da 10, 20 ve 30 dakikalık lepleme sürelerinde sabit basınç (344,75 kPa) altında leplenen malzemelerin yüzey fotoğrafları görülmektedir. Mikro fotoğraflar incelendiğinde serbest kalan aşındırıcı taneler yüzeyleri çizmiş ve yüzey yönleri paralel olmamıştır. Yüzeydeki çizikler 10 dakikada daha belirgin 30 dakikada daha az olmuştur. Lepleme işleminde tanecikler önce talaş kaldırır ve parçalanıp küçülen taneler daha sonra yüzeyi parlatma işlemi yaparlar.

### Sabit Lepleme Süresinde (20 dakika) Farklı Basınçlara Göre Yüzey Görüntüleri

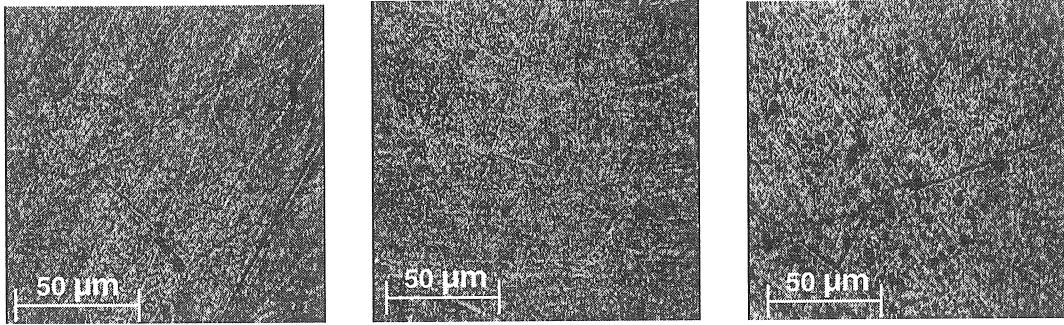
Şekil 7. ve Şekil 8.'de malzemelerin, 68,95 kPa, 344,85 kPa ve 689,5 kPa basınçlarda 20 dakika leplenmesiyle elde edilen yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, düşük basınçlarda aşındırıcı taneler lepleme diskinde gömülmediği için yüzeylerde derin ve rasgele çizikler oluşmuştur. Yüksek basınçlarda çizikler azalmış, malzemeye batmış aşındırıcıların sebep olduğu siyah noktalar artmıştır.



Şekil 3. Lepleme işleminde süre ve ortalama  $R_a$  ilişkisi

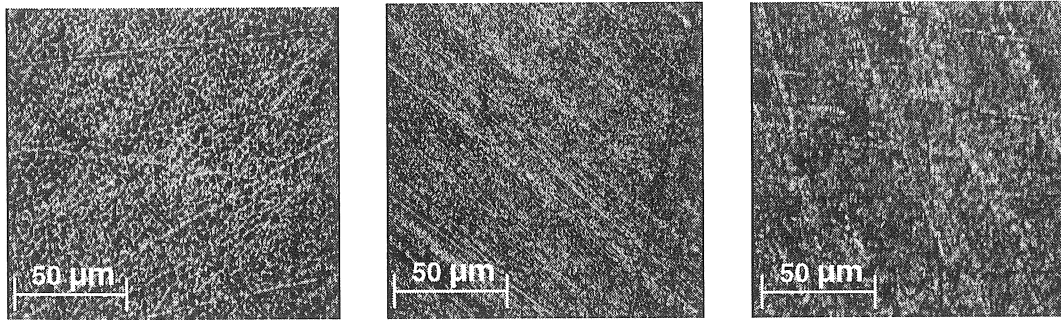


Şekil 4. Lepleme işleminde basınç ve ortalama  $R_a$  ilişkisi



Süre : 10 dakika  $R_a$  : 0,71  $\mu\text{m}$       Süre : 20 dakika  $R_a$  : 0,78  $\mu\text{m}$       Süre : 30 dakika  $R_a$  : 0,49  $\mu\text{m}$

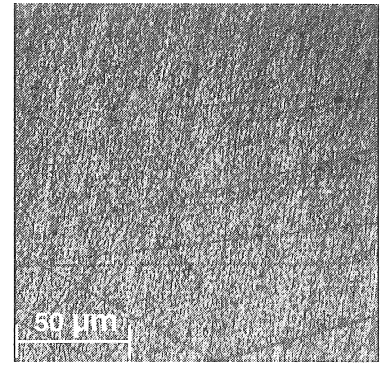
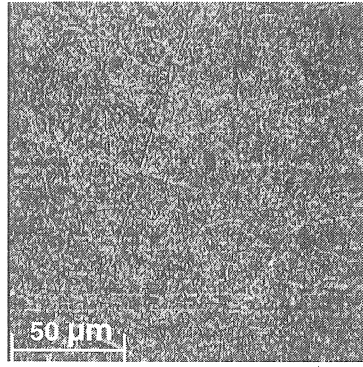
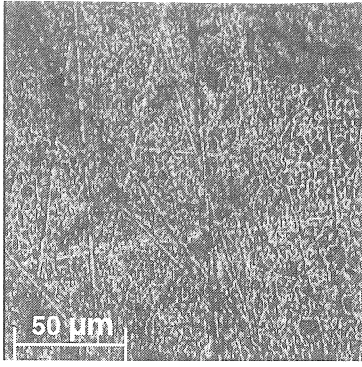
Şekil 5. Sertleştirilmiş AISI 8620 numunesinin 344,75 kPa sabit basınç altında ve farklı lepleme sürelerine göre yüzey görüntüsü



Süre : 10 dakika  $R_a$  : 0,6  $\mu\text{m}$       Süre : 20 dakika  $R_a$  : 0,75  $\mu\text{m}$       Süre : 30 dakika  $R_a$  : 0,92  $\mu\text{m}$

Şekil 6. Sertleştirilmemiş AISI 8620 numunesinin 344,75 kPa sabit basınç altında ve farklı lepleme sürelerine göre yüzey görüntüsü



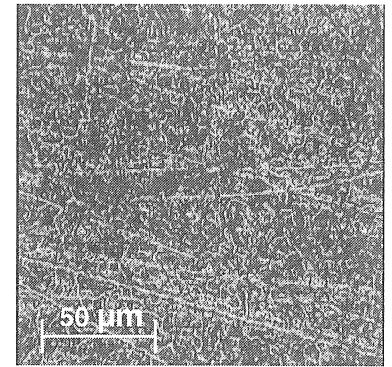
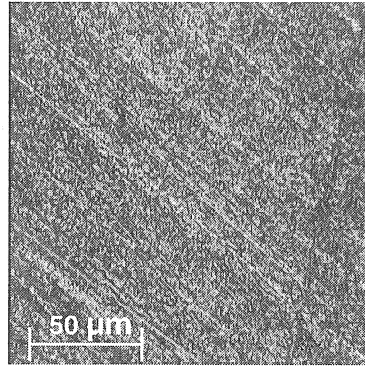
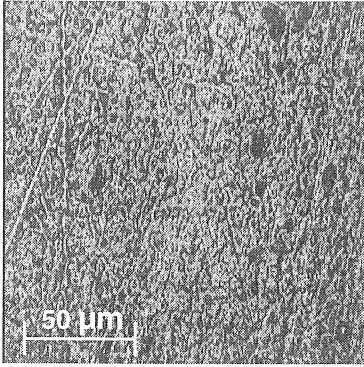


Basınç, P : 68,95 kPa  
R<sub>a</sub> : 0,72 µm

Basınç, P: 344,75 kPa  
R<sub>a</sub> : 0,78 µm

Basınç, P: 689,5 kPa  
R<sub>a</sub> : 0,68 µm

Şekil 7. Sertleştirilmiş AISI 8620 numunesinin 20 dakika sabit sürede ve farklı lepleme basınçlarına göre yüzey görüntüsü.



Basınç, P : 68,95 kPa  
R<sub>a</sub> : 1,15 µm

Basınç, P : 344,75 kPa  
R<sub>a</sub> : 0,75 µm

Basınç, P : 689,5 kPa  
R<sub>a</sub> : 0,81 µm

Şekil 8. Sertleştirilmemiş AISI 8620 numunesinin 20 dakika sabit sürede ve farklı lepleme basınçlarına göre yüzey görüntüsü.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada lepleme basıncı, lepleme süresi ve malzeme sertliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Leplemede kullanılan aşındırıcı tane büyüklüğü ve cinsi, lepleme karışım oranı, bu karışımın lepleme diskine akış debisi ve lepleme sıvısı parametreleri sabit tutulmuştur.

- Leplenen malzemenin sertliği elde edilen yüzey pürüzlülüğünde etkili olmuştur.
- Yumuşak malzemelerin leplenmesinde yüzey pürüzlülüğünde çok fazla iyileşme görülmemiştir. Bu sebeple yumuşak malzemelerin leplenmesinin iyi bir sonuç vermeyeceği düşünülmektedir.
- Lepleme işleminde tüm R<sub>a</sub> yüzey pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması sertleştirilmiş

numunelerde 0,69 µm, sertleştirilmemiş numunelerde ise 0,79 µm elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri sertleştirilmiş numunelerde % 56,5 sertleştirilmemiş numunelerde % 8,4 iyileşme olmuştur.

- Sert malzemede yüzey pürüzlülüğünde iyileşme görülmüştür.
- Aşındırıcı taneler, serbest olmaları sebebiyle, özellikle sertleştirilmemiş yüzeyde, karmaşık ve bazen derin çiziklerin oluşmasına sebep olmuştur.

Lepleme işleminde çok sayıda parametrenin olması ve bunların hepsinin tam olarak değerlendirilmesi çok zor ve zaman alıcıdır. Serbest halde dolaşan aşındırıcı taneler rasgele yüzey pürüzlülüğü meydana getirmektedir. Elde edile



sonuçlara göre yumuşak malzemelerin leplenmesi pek önerilmemektedir.

#### THE EFFECTS OF WORK MATERIAL HARDNESS ON SURFACE ROUGHNESS IN LAPPING PROCESS

In this study, the effects of work material hardness on surface roughness in lapping process have been investigated to obtain a good surface finish which is needed in many industrial fields. As a test material AISI 8620 steel was preferred. The samples were divided in two groups, first group was water hardened (40 HRC) and second group had no heat treatment at all (24 HRC). All samples were lapped according to pressures and time available on a surface lapping machine and the effects of work material hardness on surface roughness was investigated by having measured each sample's surface roughness values. At the end of lapping process, it was observed that the surface roughness of hardened samples improved significantly.

Keywords: Lapping Process, Lapping Time, Lapping Pressure, Surface Roughness, Hardness

#### KAYNAKÇA

1. Nobuhide, I.; Hitoshi, O.; Sei, M.; Toshio, K.; Toshiro, K.; B., P., "Finishing characteristics of brittle materials by ELID-lap grinding using metal-resin bonded wheels", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38 (7): 747-762 (1998).
2. Dominic, S., Kyusojin, A., Isobe, H., Kaneko, Y., "Development of a new lapping method for high precision ball screw. (1 Report) -feasibility study of a prototyped lapping tool for automatic lapping process", *Precision Engineering*, 25(1): 63-69 (2001).
3. Krar, S. F., Check, A. F., "Technology Of Machine Tools Fifth Edition", *Mc Graw Hill*, New York, 180-183 (1997).
4. Bawa, H.S., "Workshop Technology.", 2, *McGraw Hill Publishing Company Limited*, New Delhi, 320-321 (1995).
5. Bağcı, M., Erişkin, Y., Aslaner, M., "Taşlamacılık ve Alet Bileme Teknolojisi", *Milli Eğitim Basımevi*, İstanbul, 4543-470 (1982).
6. Verspui M.A., De W., G., "Three-body abrasion: influence of applied load on bed thickness and particle size distribution in abrasive processes", *Journal European Ceramic Society*, 17 (2-3): 473-477(1997).
7. Perdo, L.G., De M., Jose D. B., "Effect of crystal orientation on lapping and polishing processes of natural quartz", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47 (5): 1217-1227 (2000).
8. Kim, J.D., Choi, M.S., "Study on the optimization of the cylindrical lapping process for engineering fine-ceramics ( $Al_2O_3$ ) by the statistical design method", *Journal of Materials Processing Technology*, 52(2-4): 368-385 (1995).
9. Krar, S. F., Oswald, J. W., Amand, J.E. St., "Technology Of Machine Tools", *Mc Graw Hill*, New York, 136-138 (1984).
10. Güllü, A., "Silindirik Taşlamada İstenen Yüzey Pürüzlülüğünü Elde Etmek İçin Taşlama Parametrelerinin Bilgisayar Yardımıyla Optimizasyonu", *Doktora Tezi, G.Ü. Makine Eğitimi Bölümü*, Ankara, 25-52 (1995).
11. <http://www.mfginfo.com> (2000).
12. Jiang, W., Liu, X. L., "Lapping technique of InP single crystal wafer", *Crystal Research and Technology*, 32 (2): 243-247 (1997).
13. Güllü, A., Özdemir A., Demir, H., "Yüzey pürüzlülüğü ölçme yöntemleri ve mukayesesi", *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Teknoloji Dergisi*, 1-2: 79-92 (2003).
14. Lambropoulos, J. C.; Su, X., Tong, F., "Loose abrasive lapping hardness of optical glasses and its interpretation", *Applied Optics*, 36(7): 1501-1516 (1997).

# Plastik Enjeksiyon Kalıplılığında Üründeki Kaynak Yeri Probleminin Deneysel Olarak İncelenmesi

**Babür Özçelik**  
Yrd. Doçent

Tasarım ve İmalat Mühendisliği  
Bölümü Gebze Yüksek Teknoloji  
Enstitüsü, 41400 Gebze/Kocaeli

**Recep Uyaroğlu**  
Teknik Öğretmen

Gebze Endüstri Meslek Lisesi,  
Tesviye Bölümü  
41400 Gebze/Kocaeli

*Bu çalışmada, plastik enjeksiyon kalıplama metoduyla üretilen parçaların üstünde meydana gelen ve plastik ürünlerin görünümünü ve dayanımını önemli ölçüde etkileyen kaynak yeri problemi incelenmiştir. Değişik şekillere sahip iki parçayı aynı anda basabilen bir enjeksiyon kalıbı tasarlanılmış ve üretimi yapılmıştır. Plastik parçalarda kaynak yerine etki eden; ütüleme süresi, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon süresi gibi parametrelerin farklı değerleri için numuneler elde edilmiştir. Örnek parçaların kaynak yerleri mikroskopta incelenmiş ve MPI analiz programından elde edilen kaynak yeri koordinatlarıyla, deneysel olarak elde edilen kaynak yeri koordinatları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; yükseltile ütüleme süresi, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon süresinin parçaların üstünde meydana gelen kaynak yerinin genişliğini ve yerini olumlu etkilediği görülmüştür.*

*Anahtar Kelimeler: Plastik Enjeksiyon Kalıplılığı, Kaynak Yeri, Ütüleme Zamanı, Enjeksiyon Basıncı, Enjeksiyon Süresi*

## GİRİŞ

Kaynak yerleri (arayüz); kalıp boşluğu içerisinde, dolun aşaması esnasında plastik ergiyik akışının birden fazla sayıya bölünerek tekrar birleşmesi sonucunda meydana gelir.

Plastik malzemelerdeki kaynak yerleri; genellikle estetik (görsel) olumsuzluğun ve mekanik zayıflığın bir göstergesidir. Kalıp içerisinde akan plastik eriyiğin akış önleri yuvarlaktır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, bu yuvarlak akış önleri karşılaştıklarında düzleşerek, birbiriyle birleşir [1]. Bu birleşme, yüksek viskoziteli akan plastik eriyiğin ön kısmının çekilmesine sebep olur. Eğer sıcaklık ve basınç yeterli değilse; akan eriyiğin ön kısımlarının köşeleri tamamen birleşemez ve bu da kaynak yerinin eksik oluşmasına neden olur. Hareket eden (akan) plastik ergiyik önünün fiskeye akış özelliği, karşılamak iki akışın önünde, ön şekli düzenlenmemiş moleküller yaratır. Bu tamamlanmamış moleküller, karışma ve kaynama yüzeyi boyunca homojen bir yapı oluşumunu engeller ve parçadaki kaynak yerinin, kaynak yerinin bulunmadığı bölgeye göre daha dayanıksız olmasına neden olur [2].

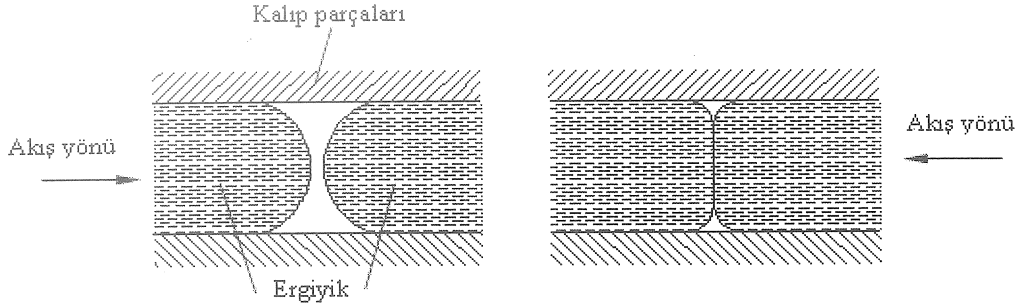
Eğer enjeksiyonda kullanılan plastik hammaddelerin içerisinde katkı maddesi varsa (örneğin; renk pigmenti); bu katkı maddelerinin kaynak yerine yakın yönelmesi ihtimali vardır. Bu aynı zamanda kaynak yerine yakın yerde renk

değişimine neden olur. Parçanın görünümünü etkileyen de bu renk değişimidir [3]. Cam elyafları ile PS karıştırılarak yapılan malzemede, kaynak yeri boyunca taneciklerin daha çok toplandığı tespit edilmiştir [4].

Kaynak yerleri yüzeysel bir çizgi değildir [5]. Kaynak yerleri kalıplanan parça içerisinde bir hat boyunca oluşurken; parçanın yüzeyinde küçük V kırıkları (izleri) şeklinde oluşabilir [3].

Kaynak yerinin incelenmesi üzerine yapılan çalışmalarda, farklı malzemeler için farklı parametreler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda daha çok kaynak yerinin dayanımı incelenmiştir. HDPE/PA6 karışımı plastik malzemenin üretilen bir üründe kaynak yerinin mekanik özellikleri ve yapısı arasındaki ilişki incelenmiştir [6]. Kaynak yerlerini; kalıplanan parçaların malzemesinin [7,8], tasarımının (duvar kalınlıkları [9], giriş yeri ve sayısı [3,10-12]), ergiyik ısısının, enjeksiyon hızının ve kalıp ısısının etkilediği belirlenmiştir [8,10-16].

Kaynak yerleri yazılımlar kullanılarak da incelenmiştir. PS malzemedeki kaynak yeri performansının tahmin yoluyla elde edildiği gösterilmiştir [17]. Bir çalışmada, CAE yazılımı, ürün geliştirilmesi esnasında tasarımın potansiyel problemi olan kaynak yerini bulmak için kullanılmıştır [2].



Şekil 1. Plastik eriyiğin akış önlerinin birleşmesi.

Bu araştırmada; enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle elde edilen parça üzerinde meydana gelen kaynak yerlerini ve fiziksel ölçülerini etkileyen enjeksiyon şartlarından; ütleme süresi, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon süresi üzerinde deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu enjeksiyon şartlarının, parça üzerindeki kaynak yerlerine olan etkileri, kaynak izlerinin genişliklerinin mikroskop altında ölçülmesi yoluyla araştırılmıştır. Ayrıca Moldflow analiz programı kullanılarak ürün üzerinde oluşan kaynak yerinin ve şeklinin, deneyde elde edilen ürünle aynı olduğu tespit edilmiştir.

## DENEYSEL ÇALIŞMA

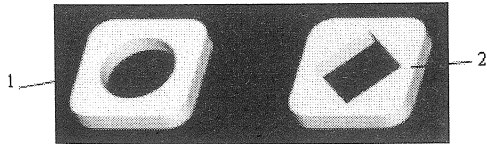
### Plastik Malzeme Seçimi

Deneysel çalışma için seçilen, analizlerde ve parçaların kalıplanmasında kullanılan plastik malzemenin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan plastik malzemenin özellikleri.

Ticari adı	Basell Polyolefins firmasının, Moplen RM6100 (PP: Polipropilen)
Kalıp ısısı	40 °C
Ergiyik ısısı	235 °C
Kalıp ısı değişimi	30 °C – 50 °C
Ergiyik ısı değişimi	200 °C – 270 °C
Kalıptan atılma ısısı	95 °C

### Parça Tasarımı



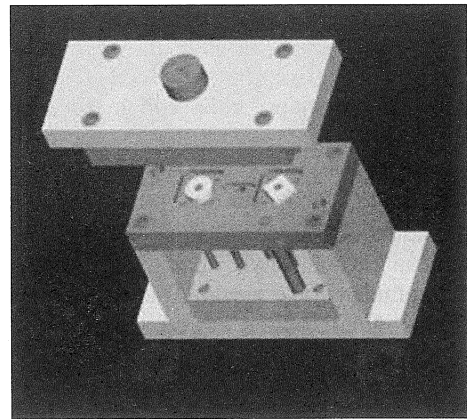
Şekil 2. Deneysel çalışma için tasarlanan parçalar:  
1. Silindirik maçalı, 2. Kare maçalı.

Enjeksiyonda kalıplanacak parçalar; iki farklı şekilde tasarlandı. Bu parçaların her ikisinin de dış şekilleri, 5 mm kalınlıkta, 32 x 32 mm kare şeklinde ve kenarları 6 mm yarıçaplı kavisli yapıldı. İç kısımları ise; birinin 17 x 17 mm kare delik, diğersinin ise; 20 mm çapında yuvarlak delik olacak şekilde tasarlandı (Şekil 2). Bu delikler kaynak yeri oluşturmak için yapıldı.

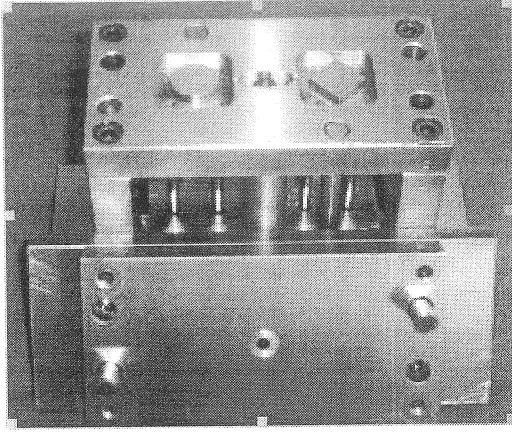
### Kalıp Tasarımı

Kalıp tasarımı, tasarlanan parçaların her ikisi de aynı anda kalıplanacak şekilde yapıldı. Yani; bir tarafı kare delikli parçayı, diğer tarafı da yuvarlak delikli parçayı kalıplamak için, kalıp iki boşluklu olarak tasarlandı. Parçaların içindeki kare ve yuvarlak deliklerin oluşumunu sağlamak için tasarlanan maçalar sayesinde; plastik eriyiğin akışının ikiye ayrılması gerçekleştirildi. İkiye ayrılan plastik eriyiğin akışının diğer tarafta birleşmesiyle kaynak yeri oluşumu elde edildi.

Şekil 2 ve 3 de görülen parça ve kalıp tasarımları; ProEngineer 2001 ve AutoCad 2002 gibi tasarım programlarından yararlanılarak gerçekleştirildi. Daha sonra parçaya göre tasarlanan kalıbın üretimi yapıldı (Şekil 4). Şekil 3. Deneysel çalışma için tasarlanan plastik enjeksiyon kalıbı. Şekil 4. Üretilen plastik enjeksiyon kalıbı.



Şekil 3. Deneysel çalışma için tasarlanan plastik enjeksiyon kalıbı.



Şekil 4. Üretilen plastik enjeksiyon kalıbı.

### PARÇALARIN ANALİZLERİ

Analizler, Moldflow Plastics Insight MPI 3.0 programında yapıldı. Bu analiz programında, dört farklı analiz yapıldı. Birinci ve ikinci parçaların analizleri, ütüleme süreleri birbirinden farklı, diğer parametreleri aynı olacak şekilde yapılmıştır. Üçüncü ve dördüncü parçaların analizleri ise; enjeksiyon basınçları ve enjeksiyon süreleri farklı, diğer parametreleri aynı olacak şekilde yapılmıştır.

#### Analizlerin Değerlendirilmesi

Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarda; kaynak yerinin kalitesine etki eden enjeksiyon parametreleri değerlendirilmiştir. Kaynak yeri ve dolayısıyla kalıplanan parçanın kalitesine etki eden bu parametreler; kalıbın tasarlanmasında, üretilmesinde ve parçanın kalıplanmasında da göz önünde bulundurulmalıdır.

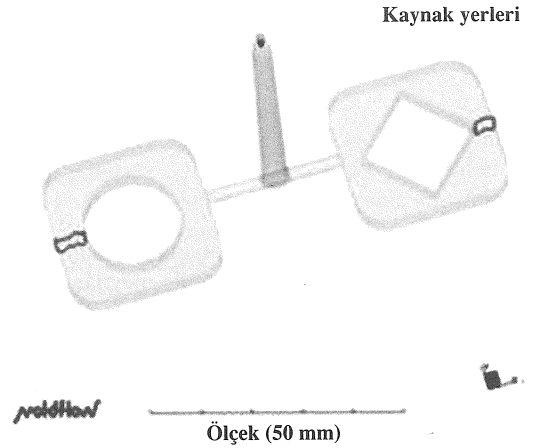
#### Ütüleme Süreleri Farklı Parçaların Analizleri

Ütüleme süreleri birbirlerinden farklı, diğer parametreleri aynı olan parçaların analizlerinde kullanılan kalıplama şartları Çizelge 2'de gösterilmektedir. Bu kalıplama şartları doğrultusunda 1 ve 2 numaralı parçaların analizleri yapılmıştır. 1 ve 2 numaralı parçaların analizlerinden elde edilen sonuçlarının birbirinin aynı olduğu görülmüştür.

#### Kaynak Yerleri

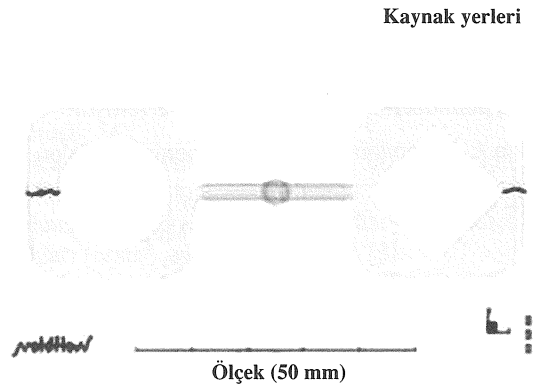
Yolluklardan geçerek girişten kalıp boşluğu içerisine akan plastik ergiyik önleri; kare ve yuvarlak maçalar tarafından ikiye ayrılmaktadır. İkiye ayrılan bu ergiyik önleri diğer tarafta birleşirler ve

birleştikleri bu bölgede kaynak yeri oluşur. 1 ve 2 numaralı parçaların kaynak yerleri tasarlandığı gibi girişin karşı tarafında akış önleri buluşacak şekilde olmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. 1 ve 2 numaralı parçaların kaynak yerleri.

Kaynak yerlerinin üstten görünüşü Şekil 6'da görülmektedir. Bu parçalardaki kaynak yerleri dümdüz bir hat olarak oluşmamaktadır.



Şekil 6. 1 ve 2 numaralı parçaların kaynak yerlerinin üstten görünüşü.

#### Enjeksiyon Basınçları ve Enjeksiyon Zamanları Farklı Parçaların Analizleri

Enjeksiyon basınçları ve enjeksiyon zamanları birbirlerinden farklı, diğer parametreleri aynı olan parçaların analizlerinde kullanılan kalıplama şartları Çizelge 3.'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. Ütülleme süreleri birbirlerinden farklı parçaların analizlerinde kullanılan kalıplama şartları [18].

Deney No	Kalıp ısısı °C	Ergiyik ısısı °C	Enj. Basıncı (Mpa)	Enj. Süresi (s)	Enj. Hızı (mm/s)	Ütülleme Basıncı (Mpa)	Ütülleme Süresi (s)	Soğuma Süresi (s)
1	40	235	8	1	20	10	4	20
2	40	235	8	1	20	10	6	20

Çizelge 3. Enjeksiyon basınçları ve enjeksiyon süreleri birbirlerinden farklı parçaların analizlerinde kullanılan kalıplama şartları [18]

Deney No.	Kalıp ısısı °C	Ergiyik ısısı °C	Enjek. Basıncı (Mpa)	Enjek. Süresi (s)	Enjeksiyon Hızı (mm/s)	Ütülleme Basıncı (Mpa)	Ütülleme Süresi (s)	Soğuma Süresi (s)
3	40	235	3	5	30	5	5.2	20
4	40	235	4	2	30	6	5.2	20

Bu kalıplama şartları doğrultusunda 3 ve 4 numaralı parçaların analizleri yapılmıştır. MPI analiz programının kapasitesi gereği, analizlerde kaynak yerinin plastik numuneler üzerinde nerede olduğu belirlenebilmiştir. Kaynak yerinin fiziksel ölçüleri bu analiz programıyla elde edilememektedir.

3 ve 4 numaralı parçaların kaynak yerlerinin 1 ve 2 numaralı parçaların kaynak yerleriyle aynı yerde ve aynı biçimde oluştuğu analizler sonucunda görülmüştür.

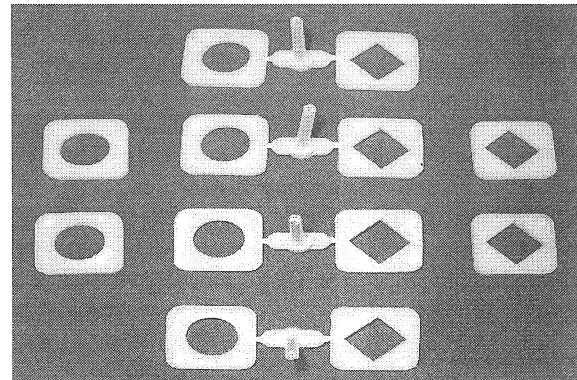
#### PARÇALARIN PLASTİK ENJEKSİYON YÖNTEMİYLE KALIPLANMASI

Parçalar, analizlerde de kullanılan kalıplama parametreleri doğrultusunda, Engel E-O3 enjeksiyon makinasında kalıplanmıştır. Bu makinanın genel özellikleri; Enjeksiyon basıncı (max.): 160 bar, Enjeksiyon ütülleme basıncı: 160 bar, Enjeksiyon hızı (max.): 154 mm/sn, Kapama kuvveti: 90 ton, Ocak sıcaklığı: 500 °C, Kalıp aralığı: 310 mm, İtici mesafesi: 100 mm, İtici basıncı (max.): 100 bar. Çalışmada kalıplanan ürünler Şekil 7'de gösterilmektedir.

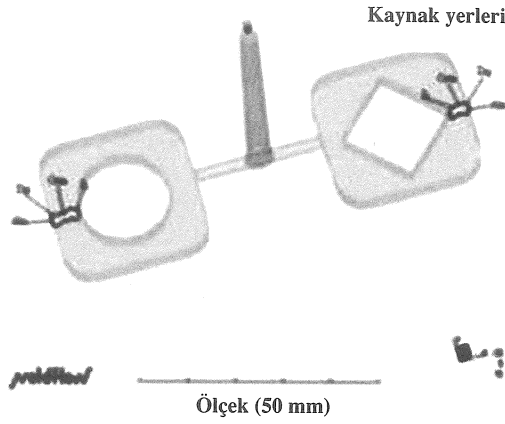
#### PARÇALARIN KAYNAK YERLERİNİN MİKROSKOPTA İNCELENMESİ

Parçaların üzerindeki kaynak yerlerinin incelenmesi; Wolpert Testor 2100 sertlik ölçme

cihazının mikroskopunda; 200 kat büyütülerek yapılmıştır. Parçaların üzerindeki kaynak yeri genişlikleri bakımından dört noktadan incelenmiştir. Bu yerler Şekil 8'de görüldüğü gibi iç, orta, dış ve alın olarak isimlendirilmiştir. Aynı ayrı isimlendirilen bu kısımlardan kaynak yeri görüntüleri alınmıştır. Elde edilen bu resimler üzerinde kaynak yeri boyunca iki ölçü alınmıştır. Bu ölçülerin ortalaması, o bölge için bir değer kabul edilmiştir. Bu şekilde elde edilen kaynak yerinin belirli bölgelerindeki genişlik değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Kalıplanan parçalar.



Şekil 8. Parçalardaki kaynak yerlerinin genişliklerinin incelendiği dört nokta.

### Ütüleme Süreleri Farklı Parçaların Kaynak Yerlerinin Mikroskopta İncelenmesi

Ütüleme süreleri farklı parçaların kaynak yerleri üzerinde, dört yerden alınan kaynak yeri genişlik değerleri Çizelge 4'te görülmektedir. Elde edilen bu

değerler sonucunda, ütüleme süresi % 50 daha fazla olan kare ve yuvarlak delikli 2 numaralı parça üzerinde kaynak yeri genişliği, 1 numaralı parçadaki kare maçalıya göre % 23, silindirik maçalıya göre ise % 51 oranında azalarak gerçekleşmiştir (Numune üzerinde iç noktadan alınan değerler için).

### ENJEKSİYON BASINÇLARI VE ENJEKSİYON SÜRELERİ FARKLI PARÇALARIN KAYNAK YERLERİNİN MİKROSKOPTA İNCELENMESİ

Enjeksiyon basınçları ve enjeksiyon süreleri farklı parçaların kaynak yerleri üzerinde, dört yerden alınan kaynak yeri genişlik değerleri, Tablo 5'te görülmektedir. Elde edilen bu değerler sonucunda, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon süresi daha yüksek olan, kare ve yuvarlak delikli 4 numaralı parça üzerinde, kaynak yerinin diğer parçadan daha iyi oluştuğu görülmektedir. 3 numaralı parçaya göre, 4 numaralı parça için enjeksiyon basıncı % 25 artırıldığı ve enjeksiyon süresi % 60 oranında azaltıldığı zaman, 4 numaralı parçada kaynak yeri genişliği kare maçalıda % 10 ve silindirik maçalıda % 61 oranında azaldığı görülmüştür (Numune üzerinde iç noktadan alınan değerler için).

Çizelge 4. Ütüleme süreleri (1 numaralı parça için 4 s, 2 numaralı parça için 6 s) farklı parçaların kaynak yerleri üzerinde, dört yerden alınan kaynak yeri genişlik değerleri [18].

Deneme	İç (µm)	Orta (µm)	Dış (µm)	Alın (µm)
1. Kare maçalı	7,4	12,7	4,3	44,1
2. Kare maçalı	5,7	11,8	3,6	16,7
1. Silindirik maçalı	7,5	8,7	7,1	12,7
2. Silindirik maçalı	3,8	5,5	3,4	8,2

Çizelge 5. Enjeksiyon basınçları (3 numaralı parça için 3 MPa ve 4 numaralı parça için 4 MPa) ve enjeksiyon süreleri (3 numaralı parça için 5 sn ve 4 numaralı parça için 2 sn) farklı parçaların kaynak yerleri üzerinde, dört yerden alınan kaynak yeri genişlik değerleri [18].

Deneme	İç (µm)	Orta (µm)	Dış (µm)	Alın (µm)
3. Kare maçalı	10,2	14,9	7,8	47,6
4. Kare maçalı	9,2	14	5,4	45,5
3. Silindirik maçalı	22,7	33,5	7,4	149,7
4. Silindirik maçalı	8,9	12,2	8,7	43

Plastik enjeksiyonda kalıplanan parçaların görünümünü ve dayanımını etkileyen önemli problemlerden birisi olan kaynak yerleri üzerine yapılan bu çalışmada; Moldflow Plastics Insight MPI 3.0 programında yapılan analizler ile Wolpert Testor 2100 sertlik ölçme cihazının mikroskopunda yapılan gözlemler sonucunda; kaynak yerlerinin, MPI yazılımınca önerilene yakın yerde ve benzer şekilde olduğu görülmüştür. Parçalar üzerindeki kaynak yerleri kalıp boşluk girişinin tam karşısında, kıvrımlı bir hat olarak meydana gelmektedir.

Ayrıca; yükseltile ütüleme süresi, enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon süresinin, parçaların üstünde meydana gelen kaynak yerlerinin genişliğini azalttığı ve dolayısıyla parçanın kaynak yeri görünümünü ve dayanımını da olumlu etkilediği görülmüştür.

Ütüleme süresinin artırılmasıyla ütüleme basıncı altında, kalıp içerisine giren ergiyik malzeme artırılmış olur. Dolayısıyla, kaynak yerlerine daha fazla malzemenin gitmesi sağlanır. Kaynak yerlerine daha fazla giden ergiyik malzeme kaynak yerlerinin genişliğinin azalmasına neden olur. Bu da kaynak yerlerinin ve kalıplanan parçanın, görünüm bakımından daha iyi olmasını sağlar.

Enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon süresinin artırılması ile kalıp içerisine daha yüksek basınçla, daha fazla ergiyik malzeme girmesi sağlanmış olur. Daha yüksek basınçla ve daha fazla miktarda ergiyik malzemenin kalıp içerisine girmesi, yüksek ısıya sahip olması nedeniyle kaynak yerlerini olumlu yönde etkiler. Böylece; kalıplanan parçanın kaynak yerlerinin daha kaliteli oluşması sağlanır.

Aynı şartlarda kalıplanan daire ve kare kesitli maçalara sahip ürünlerden, yuvarlak kesite sahip olanlarda oluşan kaynak yerinin genişliğinin, çalışmada kullanılan enjeksiyon parametrelerinden çok etkilendiği ve kare kesitli maçaya göre daha az olduğu görüldü.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar; kalıp tasarımındaki yardımlarından dolayı Gebze Endüstri Meslek Lisesi Kalıp Bölümü Öğretmenleri'ne, kalıplanacak parçaların analizlerinin yapılmasında yardımcı olan Araş. Gör. Tuncay ERZURUMLU'ya, parçaların kalıplanmasında yardımcı olan FARPLAS Fabrikası çalışanlarına, üretilen parçaların mikroskopta incelenmesine yardımcı olan GYTE, Malzeme Mühendisliği Bölümü Teknisyeni Adem ŞEN'e teşekkür eder.

## EXPERIMENTAL STUDY OF WELDLINES IN PLASTIC INJECTION MOLDED PARTS

In this study, a weldline problem affected appearance and strength of plastic products produced using the plastic injection molding method was investigated. An injection mold having two different cavity shapes that can be capable of pressing two parts at the same time was designed and produced. Parameters for different values of packing time, injection pressure and injection time affected the weldline on plastic parts were evaluated and pressed. The weldlines were examined under microscope and compared with MPI analysis program. It was observed that increasing of packing time, injection pressure and injection time influenced the location and thickness of weldline on the parts.

Keywords: Plastic Injection Molding, Weldline, Packing time, injection pressure, Injection time

## KAYNAKÇA

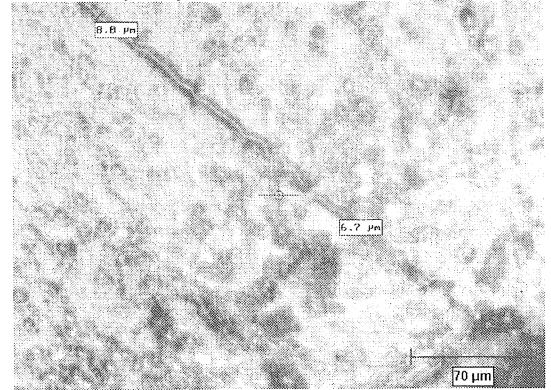
1. Mills N. J., *Plastics, Microstructure and Engineering – Applications – Second Edition*, pp. 133 – 134, 1993.
2. Hsieh T., Hsu D. C., Lin A. S., Day A. G., Chang R. Y., *Improvement of Pentium – II Connector Support Design By CAE Tool*, Hua-Seng Co., CoreTech System Co., National-Tsing Hua University, Taiwan, [www.moldex3d.com/en/services/paper/antec/2000/0515.PDF](http://www.moldex3d.com/en/services/paper/antec/2000/0515.PDF)
3. Yao D. G., Kim B., *Direct – Search – Based Automatic Minimization of Weldlines in Injection – Molded Parts*, *Polymer – Plastics Technology and Engineering*, 37 (4), pp. 509 – 525, 1998.
4. Ogadhoh S. O., Papathanasiou T. D., *On Microstructure At The Weldline in Injection Moulded Particulate Composites*, *Scripta Materialia*, Vol.37, No.8, pp. 1143 – 1149, 1997.
5. *GE Plastics Injection Molding Mini Guide*, pp. 65 – 66, 1998, [www.geplastics.com](http://www.geplastics.com)
6. Fellahi S., Fisa B., Favis B. D., *Weldline Strength in Injection Molded HDPE / PA6 Blends: Influence of Interfacial Modification*, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.57, pp. 1319 – 1332, 1995.
7. Tomari K., Harada T., Maekawa Z., Hamada H., Iwamoto M., Ukai A., *Fracture Toughness of Weldlines in Thermoplastic Injection Molding*, *Polymer Engineering and Science*, Vol.33, No.15, pp. 996 – 1001, 1993.



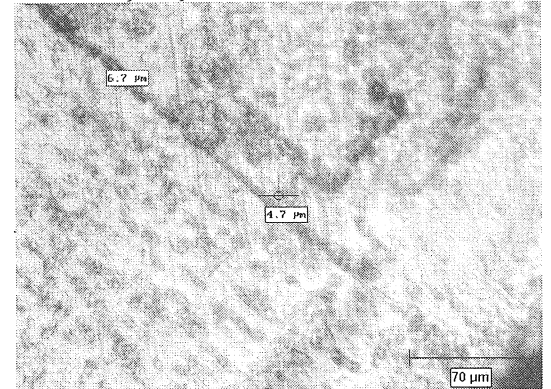
8. Beall G., Weldlines, [www.immnet.com/articlelibrary/archive/getOneArticle.php3?getArtID=1577](http://www.immnet.com/articlelibrary/archive/getOneArticle.php3?getArtID=1577)
9. Chun D. H., Cavity Filling Analyses of Injection Molding Simulation: Bubble and Weld Line Formation, *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, pp. 177 –181, 1999.
10. Kagan V. A., Optimized Mechanical Performance of Welded and Molded Butt Joints: Part I – Similarities and Differences, [www.honeywell-plastics.com/literatu/techpapers/0064.pdf](http://www.honeywell-plastics.com/literatu/techpapers/0064.pdf)
11. Kagan V.A., “Optimized Mechanical Performance of Welded and Molded Butt Joints: Part II – Weld and Knit Lines Integrity”, [www.honeywell-plastics.com/literature/techpapers/1063.pdf](http://www.honeywell-plastics.com/literature/techpapers/1063.pdf)
12. Kagan V. A., Mazza J., Palley I., “Optimizing Mechanical Performance of Injection Molded Multiple Gated Rotating Thermoplastic Components: Part I – Consideration of Structural Analyses and Knit Line (Weldline) Effects”, [www.honeywell-plastics.com/literature/techpapers/sae.pdf](http://www.honeywell-plastics.com/literature/techpapers/sae.pdf)
13. Koster R. P., Importance of Injection Molding Parameters for Mechanical Performance of Cold Flow Weld Lines, *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 154 – 158, 1999.
14. Chung Y. H., Kato K., Otake N., Melt Front Surface Asperity and Welding- Defect Generation in Ceramic Injection Molding, *Journal of Materials Processing Technology*, 111, pp. 219 – 224, 2001.
15. Hrishikesh, K., Turng L.-S., Spindler, R., Study of Weldline-Line Strength and Microstructure of Injection Molded Microcellular Parts, Paper Draft for SPE ANTEC 2002, pp. 1-5.
16. Merhar C. F., Beiter K. A., Ishii K., Weld-line Strenght in Injection Molded PVC Parts, The Ohio State University, Columbus, [www.mml.stanford.edu/Research/Papers/1994/papers94](http://www.mml.stanford.edu/Research/Papers/1994/papers94)
17. Kim S. G., Suh N. P., Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers, *Polymer Engineering and Science*, Vol.26, No. 17, pp. 1200 – 1207, 1986.
18. Uyaroğlu R., Plastik Enjeksiyon Kalıpcılığında Kaynak Yeri Probleminin (Weldline) incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Tasarım ve İmalat Müh. Böl., Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2003.

## EK A.Ütüleme Süreleri Farklı Parçaların Kaynak Yerleri Üzerinde Çeşitli Yerlerdeki Kaynak Yeri Genişlikleri

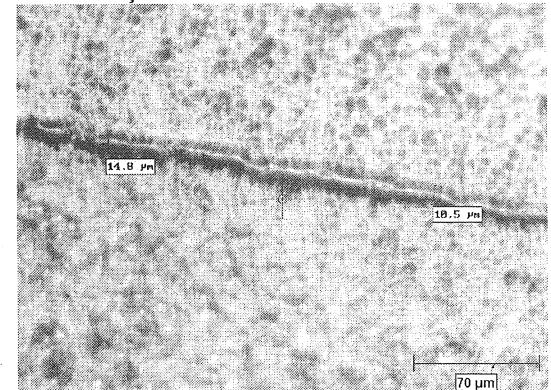
1 Kare maçalı iç



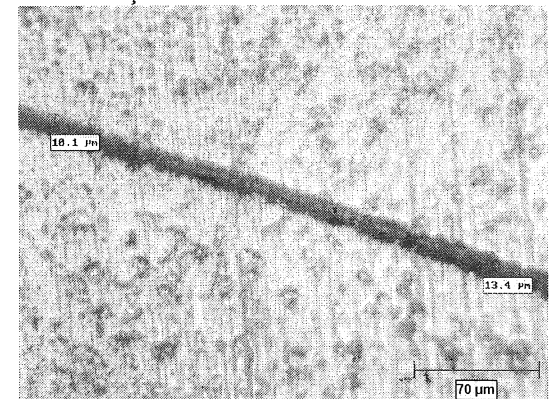
2 Kare maçalı iç



1 Kare maçalı orta

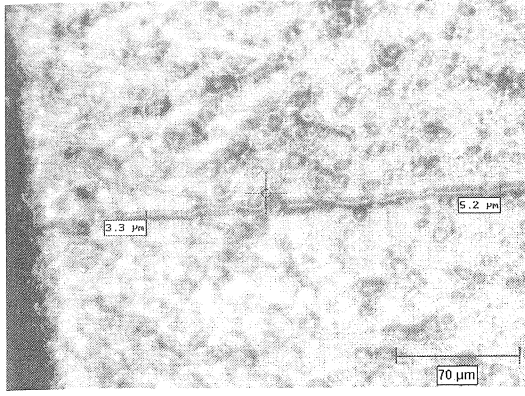


2 Kare maçalı orta

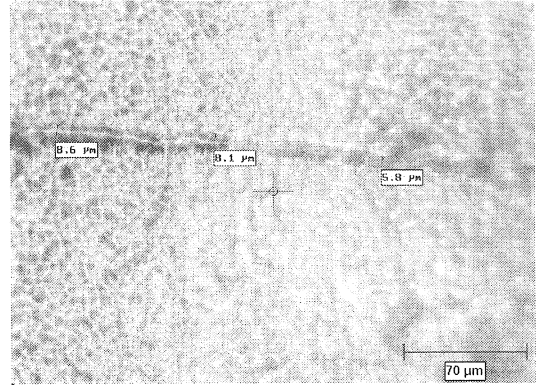




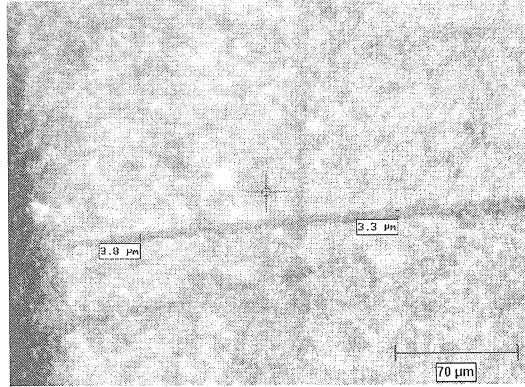
1 Kare maçalı dış



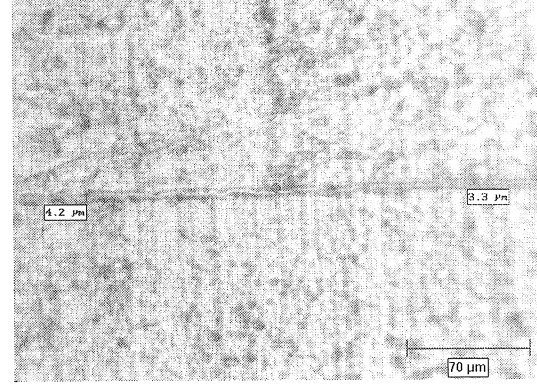
1 Silindirik maçalı iç



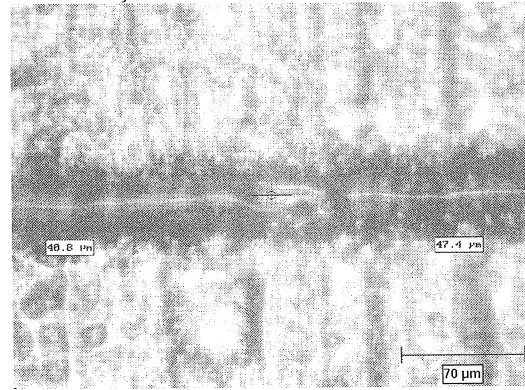
2 Kare maçalı dış



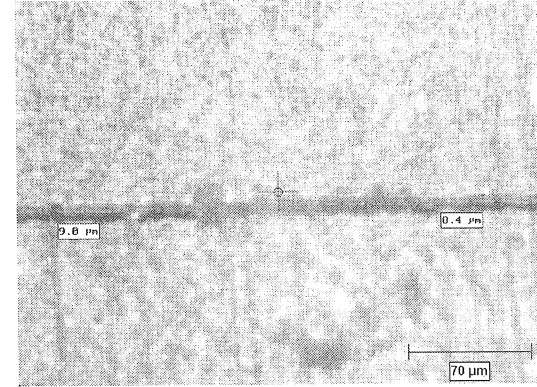
2 Silindirik maçalı iç



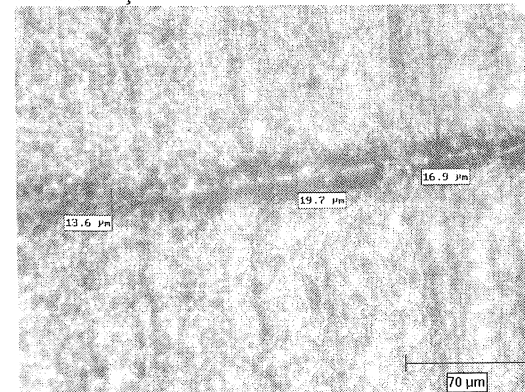
1 Kare maçalı alın



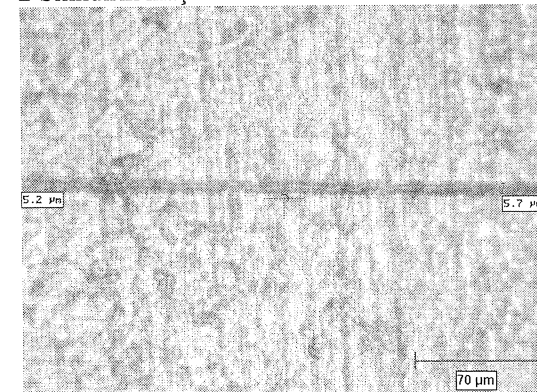
1 Silindirik maçalı orta



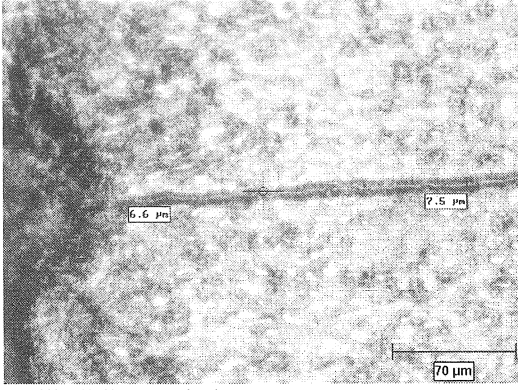
2 Kare maçalı alın



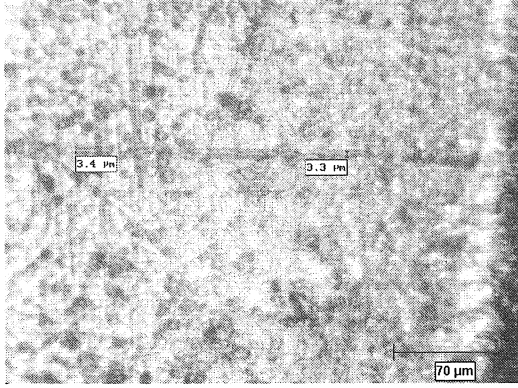
2 Silindirik maçalı orta



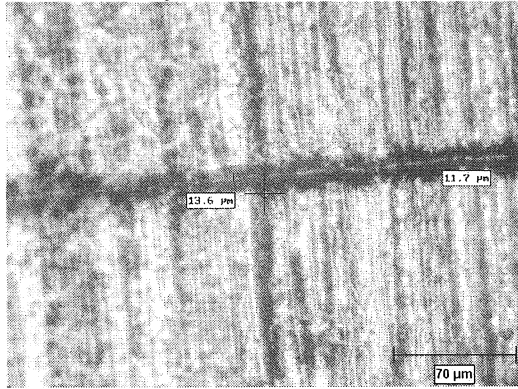
1 Silindirik maçalı dış



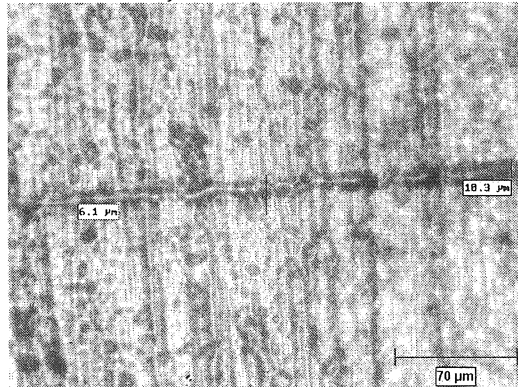
2 Silindirik maçalı dış



1 Silindirik maçalı alın

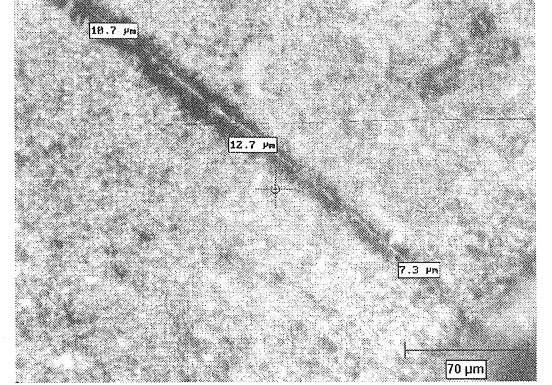


2 Silindirik maçalı alın

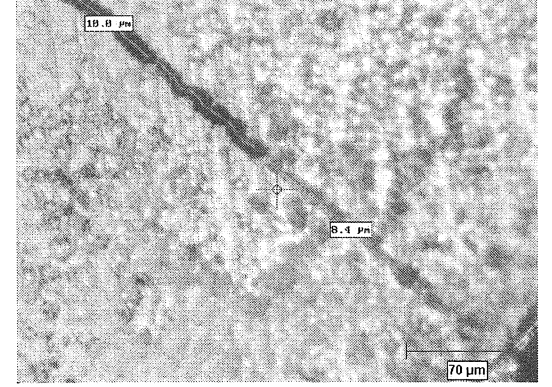


## EK B. Enjeksiyon Basınçları ve Enjeksiyon Süreleri Farklı Parçaların Kaynak Yerleri Üzerinde Çeşitli Yerlerdeki Kaynak Yeri Genişlikleri

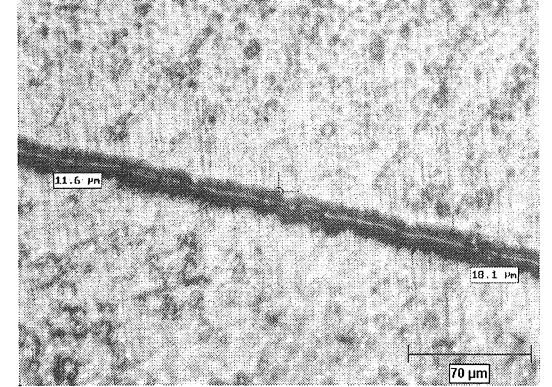
3 Kare maçalı iç



4 Kare maçalı iç

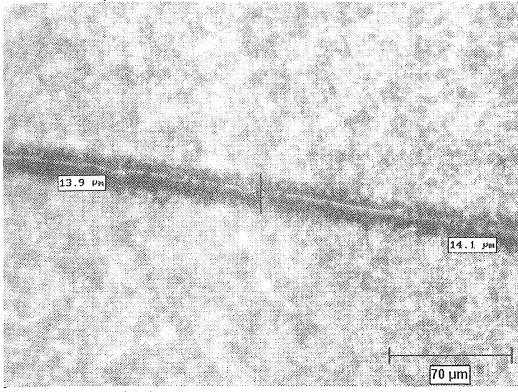


3 Kare maçalı orta

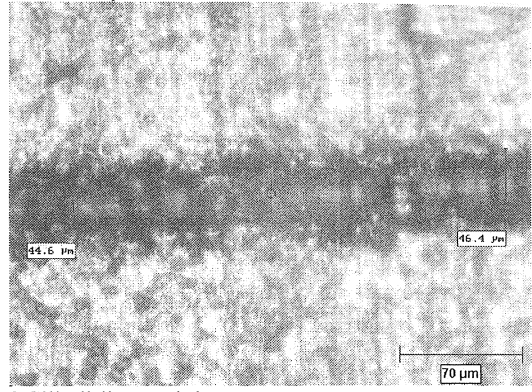




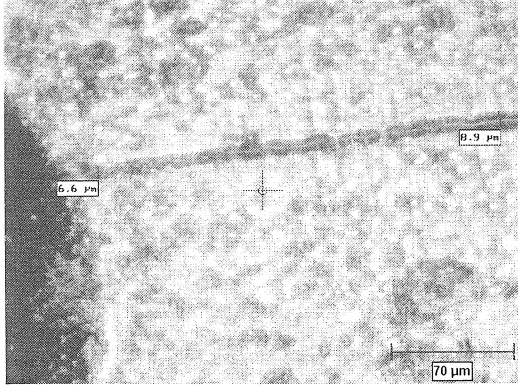
4 Kare maçalı orta



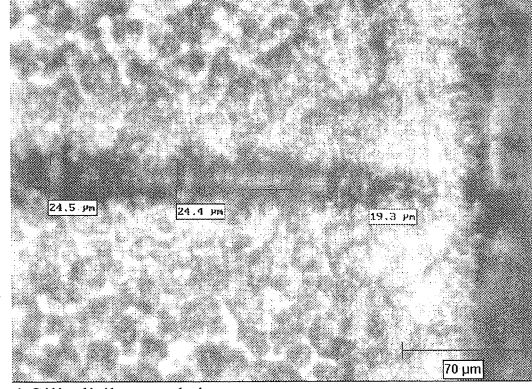
4 Kare maçalı alın



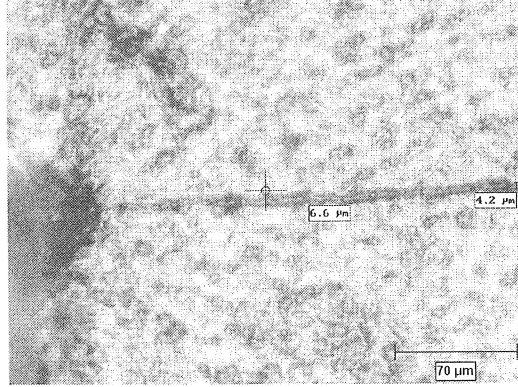
3 Kare maçalı dış



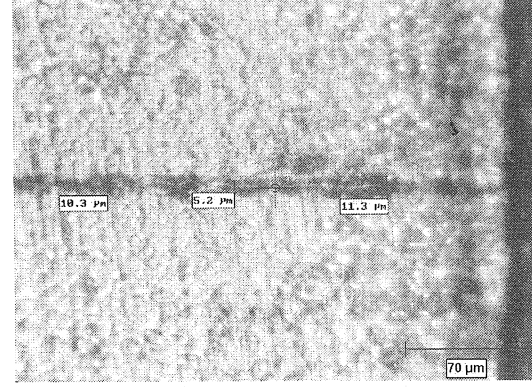
3 Silindirik maçalı iç



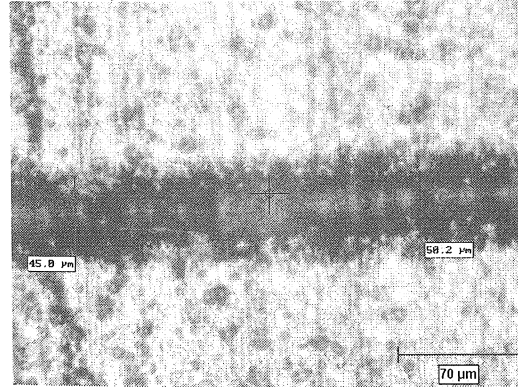
4 Kare maçalı dış



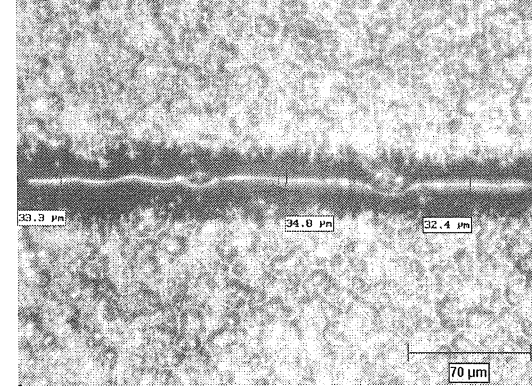
4 Silindirik maçalı iç



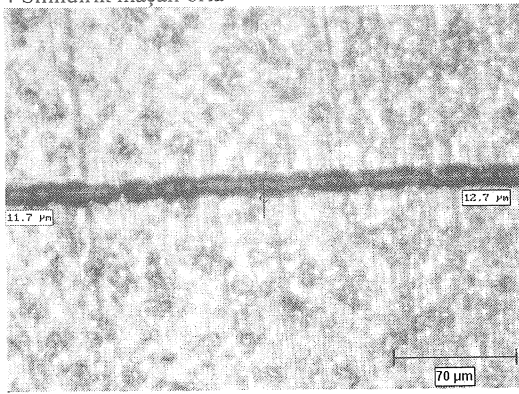
3 Kare maçalı alın



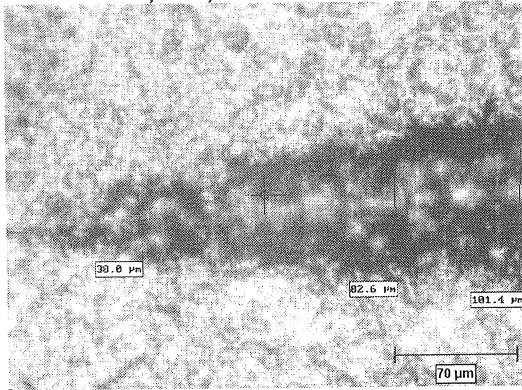
3 Silindirik maçalı orta



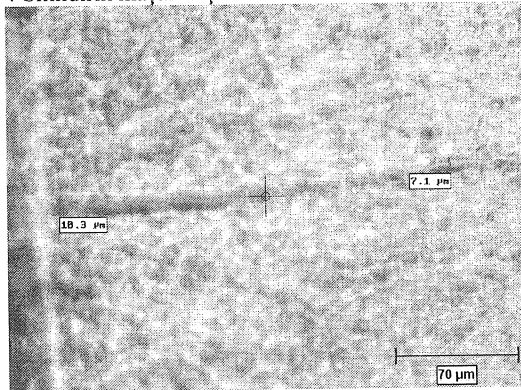
4 Silindirik maçalı orta



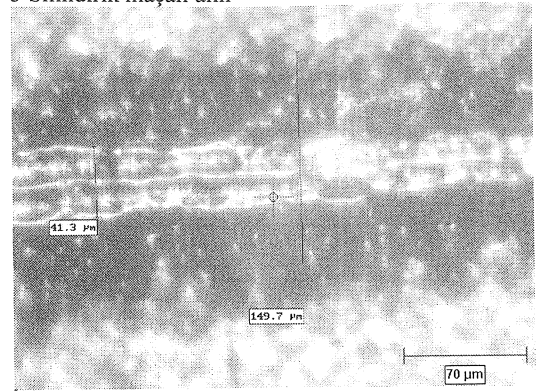
3 Silindirik maçalı dış



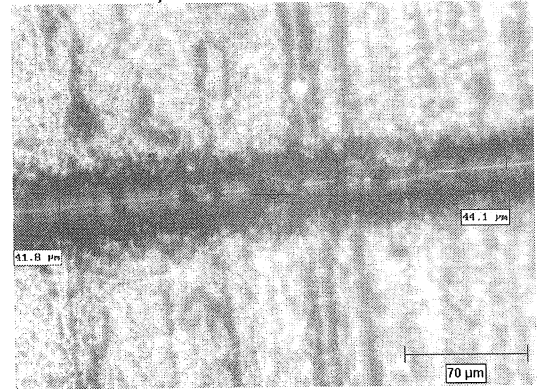
4 Silindirik maçalı dış



3 Silindirik maçalı alın



4 Silindirik maçalı alın



# Endüstriyel Bir Robot İçin İnsan-Makina Arayüz Programının Geliştirilmesi

**Mahir Cihan Cengiz**

**Bilgin Kaftanoğlu**  
Prof. Dr.

Makina Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara

*Bu çalışmada, bir endüstriyel robotu kontrol eden bir yazılım tanıtılmaktadır. Bahsi geçen robot altı serbestlik dereceli olup, ODTÜ Bilgisayar Destekli Tasarım, Üretim ve Robotik Merkezi'nde imal edilmiştir. Kullanıcı, bu programla, robot kolunu çalışma hacmi içinde istediği pozisyon ve yönelime gönderebilir. Bu amaç için robotun ileri ve geri kinematik analizleri yapılmıştır. Robotun üç boyutlu görünümünü sağlamak için, programa simülasyon penceresi eklenmiştir. Ayrıca program, verilen noktalar için rota oluşturabilmektedir.*

*Anahtar Kelimeler: Endüstriyel Robot, Kinematik analiz, Rota oluşturma.*

## GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde robotların yeri çok büyüktür. Özellikle üretim ve montaj hatlarında endüstriyel robot kolları kullanılır. Robotların kullanılmasındaki en büyük etken, robotların hızlı ve hassas olmalarıdır. Ayrıca insan için tehlikeli olabilecek bazı işlemlerde de robotlar kullanılır. Bu çalışmada altı eksenli bir endüstriyel robot için hazırlanan arayüz programı açıklanmıştır.

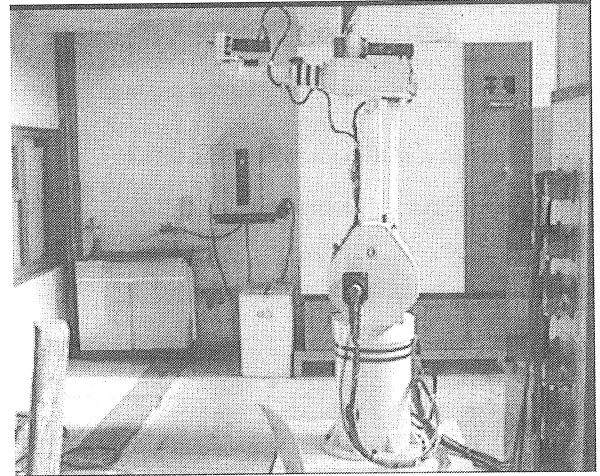
Bu çalışmada bahsi geçen robot, ODTÜ Bilgisayar Destekli Tasarım, Üretim ve Robotik Merkezinde üretilmiştir. Üretim aşamalarında tez öğrencileri görev almıştır. Robot, Şekil.1'de görülmektedir. Robot altı serbestlik derecelidir ve altı adet AC/Servo motora sahiptir. Bu motorlar Delta/Tau motor kontrol kartı ile kontrol edilmektedir.

Öncelikle robotun düz ve ters kinematik analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu analizler yardımıyla, uzay koordinatları ile eksen koordinatları arasındaki dönüşüm matrisleri bulunmuştur. Bu dönüşüm matrisleri yardımıyla, robotun, konum, hız ve ivme analizleri yapılmaktadır. Diğer kademe ise yörünge planlamasıdır. Robotun yapması istenen işleme göre, uç noktasının yörünge planlaması yapılacaktır. Bu planlama esnasında robotun hareketinin başlangıç ve bitiş noktalarının yanısıra, ara noktalar da verilebilmektedir. Bu sayede, robotun istenen yörüngede hareket etmesi sağlanmaktadır.

Geliştirilecek arayüz programında bu noktalar kolaylıkla belirlenebilecek ve daha sonra robot bu planlanan yörünge içinde kolaylıkla hareket ettirilebilecektir.

## KİNEMATİK ANALİZLER

Bu bölümde robotun konum, hız ve ivme analizleri incelenecektir. Robotta altı adet dönel eklem bulunmaktadır ve bu eklemlerin hepsi birer serbestlik derecelidir.



Şekil 1. Robotun Genel Görünüşü

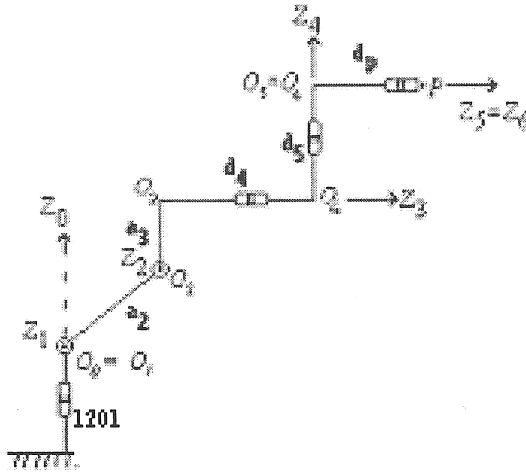
Kinematik analizler robotun eklem koordinatları ile uzay koordinatları arasındaki ilişkiyi açıklamak amacıyla yapılır. Bu analizleri düz ve ters olmak üzere iki kısma ayırabiliriz. Düz analizlerde, robotun eklem parametreleri (pozisyon, hız ve ivme) kullanılarak, robotun uç işlemcisinin uzay konum parametreleri hesaplanır. Ters analizlerde ise, bu sefer robotun uç işlemcisinin konum parametreleri kullanılarak eklem parametreleri bulunur. Robot programlama uygulamalarında ters kinematik

analizler önemlidir, çünkü robot kullanıcısı, robotun eklemlerini kontrol ederek, robotun uç işlemcisine komut etmektedir.

Bu analizleri yapabilmek için, bitişik uzuvlar arasındaki öteleme ve dönme parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla Hartenberg ve Denavit (HD) tarafından ortaya çıkarılan yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, matris metodu kullanılmıştır [4, 5].

### HD Parametreleri ve Ön Bilgiler

Robotun HD parametrelerini bulmak için şematik model Şekil 2'ye verilmiştir.



(O<sub>0</sub> noktasının yerden yüksekliği, mm.)

Şekil 2. Robotun Şematik Modeli

Bu modele göre, HD parametreleri aşağıdaki tablodaki gibi tanımlanabilir. (Çizelge 1)

Çizelge 1. Robotun HD Parametreleri

Eksen Numarası	a	d	$\alpha$	$\theta$
1	0	0	$\pi/2$	j.v. (Eklem Değişkeni)
2	a <sub>2</sub>	0	0	j.v.
3	a <sub>3</sub>	0	$-\pi/2$	j.v.
4	0	d <sub>4</sub>	$-\pi/2$	j.v.
5	0	d <sub>5</sub>	$\pi/2$	j.v.
6	0	d <sub>6</sub>	0	j.v.

Bu parametreler kullanılarak uzuvlar arasındaki dönme matrisleri şu şekilde tanımlanabilir.  $\tilde{C}_{i-1}^i$  uzuv (i-1) ve uzuv (i) arasındaki dönme matrisi olmak üzere,

$$\tilde{C}_{i-1}^i = e^{\tilde{u}_3 \theta_i} \cdot e^{\tilde{u}_1 \alpha_i} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir [4, 5].

Burada,

$$\bar{u}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \bar{u}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \bar{u}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

temel birim vektörleridir ve

$$\bar{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}$$

gibi genel bir vektöre karşılık gelen vektörel çarpım matrisi şöyle tanımlanmıştır:

$$\tilde{n} = \begin{bmatrix} 0 & -n_3 & n_2 \\ n_3 & 0 & -n_1 \\ -n_2 & n_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Böylelikle,

$$e^{\tilde{u}_1 \theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \\ 0 & \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \end{bmatrix}$$

ve,

$$e^{\tilde{u}_3 \theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ifadeleri elde edilir. Yukarıdaki ifadeler kullanılarak, uzuvlar arasındaki dönme matrisleri bulunabilir.

### KONUM ANALİZLERİ

#### i. Düz Konum Analizi

Robotun uç işlemcisinin konum ve yönelimi, robotun eksen açıları kullanılarak bulunur. Buna düz konum analizi denir. Bu analiz sembolik olarak yapılır. Bu analizden bulunan ifadeler, kinematik analizin diğer kısımlarında kullanılır. Robotik uygulamalarında genellikle düz konum analizi kullanılır, çünkü, uygulamalarda genellikle robotun uç işlemcisinin konumu ve yönelimi kontrol edilmek istenir. Bu analiz için öncelikle yönelimin bulunması gerekir, çünkü analizin devamında, yönelim bulunurken elde edilen ifadeler kullanılır.

Robotun uç işlemcisinin yönelimini bulmak için, uzuvlar arasındaki dönme matrisleri çarpılır, çünkü uzuv uzunlukları, robotun uç işlemcisinin yönelimini

etkilemez. Buna göre, robotun uç işlemcisinin yönelim matrisi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\tilde{C} = \tilde{C}_0^6 = \tilde{C}_0^1 \cdot \tilde{C}_1^2 \cdot \tilde{C}_2^3 \cdot \tilde{C}_3^4 \cdot \tilde{C}_4^5 \cdot \tilde{C}_5^6 \quad (2)$$

Robotun uç noktasının konumu ise şu şekilde ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} \bar{P} = & a_2 \cdot \bar{u}_1^{(2)} + a_3 \cdot \bar{u}_1^{(3)} \\ & + d_4 \cdot \bar{u}_3^{(3)} + d_5 \cdot \bar{u}_3^{(4)} + d_p \cdot \bar{u}_3^{(6)} \end{aligned} \quad (3)$$

yukarıdaki denklemlerde,

$\bar{u}_1$  ve  $\bar{u}_3$ , yere bağlı eksen takımında x ve z yönündeki birim vektörler,

$\bar{u}_1^{(x)}$  ve  $\bar{u}_3^{(x)}$ , x uzvuna bağlı eksen takımında x ve z yönündeki birim vektörleridir.

$\bar{u}_n^{(x)}$  yere bağlı eksen takımında şu şekilde ifade edilebilir;

$$\bar{u}_n^{(x)} = C_0^x \cdot \bar{u}_1$$

Çözümü basitleştirmek için,  $O_5$  noktasının  $O_0$  noktasına göre konumu, bilek noktası konumu,  $\bar{R}$  olarak ifade edilebilir. Buna göre;

$$\bar{P} = \bar{R} + d_p \cdot \tilde{C} \cdot \bar{u}_3 \quad (4)$$

yukarıda  $\bar{R}$  vektörünün elemanları;

$$R_1 = A \cdot \cos(\theta_1) - d_5 \cdot \cos(\theta_4) \cdot \sin(\theta_1) \quad (5)$$

$$R_2 = A \cdot \sin(\theta_1) + d_5 \cdot \cos(\theta_4) \cdot \cos(\theta_1) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} R_3 = & a_2 \cdot \sin(\theta_2) + a_3 \cdot \sin(\theta_{23}) \\ & + d_4 \cdot \cos(\theta_{23}) - d_5 \cdot \sin(\theta_{23}) \cdot \sin(\theta_4) \end{aligned} \quad (7)$$

yukarıdaki denklemlerde;

$$\begin{aligned} A = & a_2 \cdot \cos(\theta_2) + a_3 \cdot \cos(\theta_{23}) \\ & - d_4 \cdot \sin(\theta_{23}) - d_5 \cdot \cos(\theta_{23}) \cdot \sin(\theta_4) \end{aligned}$$

$$\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3$$

Bu durumda,  $\bar{P}$  vektörünün elemanları ise aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P_1 = R_1 + c_{13} \cdot d_p \quad (8)$$

$$P_2 = R_2 + c_{23} \cdot d_p \quad (9)$$

$$P_3 = R_3 + c_{33} \cdot d_p \quad (10)$$

Yukarıda  $c_{xy}$ ,  $\tilde{C}$  matrisinin xy elemanıdır.

## ii. Ters Konum Analizi

Ters konum analizi, robotun uç işlemcisinin konumu ve yönelimi verildiğinde, robotun bu konuma gelebilmesi için gereken eklem açılarının bulunmasıdır. Bu işlem için öncelikle robotun dönme ve öteleme matrisleri bulunur. İşlem basitliği için robotun uç noktasının yerine, denklemleri daha basit olan bilek noktası tercih edilir.

Bilek noktasının konum vektörü ( $\bar{R}$ ) bulunduktan sonra, bu vektörün ve  $\tilde{C}$  matrisinin elemanları kullanılarak, eklem açıları bulunur. Bu işlem düz konum analizini tersidir.

Genelde, ters konum analizi, tamamen analitik yolla bulunur, fakat bazı robotlarda, robotun şekli itibariyle analitik metod uygulanamaz. Bu robotta, bilek noktasının konum denklemleri dört eklem açısına bağlıdır ve dönme matrisi ise bütün eklem açılarına bağlıdır. Bu nedenle yarı-analitik metod uygulanmalıdır [5]. Bu metodda, açılardan biri ( $\theta_1$ ) biliniyormuş gibi kabul edilip, konum denklemlerinden diğer üç açı ( $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ ), biliniyormuş kabul edilen açı cinsinden yazılır. Daha sonra dönme matrisi ve bulunan açıların fonksiyonları kullanılarak, diğer açılar bulunur [1].

Öncelikle verilen uç nokta konumu ve yönelimi kullanarak, 8-10 numaralı denklemlerden, bilek noktası konumu bulunur:

$$R_1 = P_1 - c_{13} \cdot d_p \quad (11)$$

$$R_2 = P_2 - c_{23} \cdot d_p \quad (12)$$

$$R_3 = P_3 - c_{33} \cdot d_p \quad (13)$$

Bu denklemler kullanılarak;

$$R_1 = A_1 \cdot \cos(\theta_1) - A_2 \cdot \sin(\theta_1) \quad (14)$$

$$R_2 = A_1 \cdot \sin(\theta_1) + A_2 \cdot \cos(\theta_1) \quad (15)$$

elde edilir. burada;

$$\begin{aligned} A_1 = & a_2 \cdot \cos(\theta_2) + a_3 \cdot \cos(\theta_{23}) \\ & - d_4 \cdot \sin(\theta_{23}) - d_5 \cdot \cos(\theta_{23}) \cdot \sin(\theta_4) \end{aligned} \quad (16)$$

ve

$$A_2 = d_5 \cdot \cos(\theta_4) \quad (17)$$



14 ve 15 no'lu denklemlerden,

$$A_1 = R_1 \cdot \cos(\theta_1) + R_2 \cdot \sin(\theta_1) \quad (18)$$

$$A_2 = R_2 \cdot \cos(\theta_1) - R_1 \cdot \sin(\theta_1) \quad (19)$$

elde edilir. 17 nolu denklem kullanılarak  $\theta_4$  bir işaret belirsizliğiyle bulunabilir;

$$\theta_4 = \sigma_4 \cdot \cos^{-1}(A_2 / d_5) \quad (20)$$

burada,  $\sigma_4$  (-) ya da (+) olarak seçilebilir.

Park konumunda,  $\theta_4$  'ün değeri -90 derecedir. Robot hedefe sağ taraftan yaklaşması isteniyorsa, bir başka deyişle, sağ el konfigürasyonu isteniyorsa,  $\theta_4$  dar açı olmalıdır, bu nedenle  $\sigma_4$  pozitif seçilir. Diğer konfigürasyon için  $\sigma_4$  negatif seçilir.

7 ve 16 numaralı denklemlerden;

$$\cos(\theta_2) = \frac{A_1 - (a_3 \cdot \cos(\theta_{23}) - d_4 \cdot \sin(\theta_{23}) - d_5 \cdot \cos(\theta_{23}) \cdot \sin(\theta_4))}{a_2} \quad (21)$$

$$\sin(\theta_2) = \frac{R_3 - (a_3 \cdot \sin(\theta_{23}) + d_4 \cdot \cos(\theta_{23}) - d_5 \cdot \sin(\theta_{23}) \cdot \sin(\theta_4))}{a_2} \quad (22)$$

elde edilir ve

$$\cos^2(\theta_2) + \sin^2(\theta_2) = 1$$

olduğu göz önüne alınarak, aşağıdaki denklem oluşturulabilir.

$$B_2 \cdot \sin(\theta_{23}) + A_2 \cdot \cos(\theta_{23}) + C_2 = 0 \quad (23)$$

burada,

$$\begin{aligned} A_2 &= 2 \cdot A_1 \cdot d_5 \cdot \sin(\theta_4) - 2 \cdot R_3 \cdot d_4 - 2 \cdot A_1 \cdot a_3 \\ B_2 &= 2 \cdot A_1 \cdot d_4 + 2 \cdot R_3 \cdot d_5 \cdot \sin(\theta_4) - 2 \cdot R_3 \cdot a_3 \\ C_2 &= A_1^2 + R_3^2 - d_5^2 \cdot \cos^2(\theta_4) + d_5^2 + d_4^2 + a_3^2 \\ &\quad - a_2^2 - 2 \cdot a_3 \cdot d_5 \cdot \sin(\theta_4) \end{aligned}$$

Bu eşitliğin çözümünden ise,

$$\theta_{23} = 2 \cdot \tan^{-1}(t) \quad (24)$$

bulunur. Burada yine bir işaret belirsizliği ile;

$$t = \frac{B_2 + \sigma_2 \cdot \sqrt{B_2^2 + A_2^2 - C_2^2}}{A_2 + C_2}$$

ve  $\sigma_2$  (-) ya da (+) olarak seçilebilir.

Eğer  $\sigma_2$  pozitif alınırsa, dirsek yukarı konfigürasyon seçilmiş olur.  $\sigma_2$  negatif olursa, çözüm dirsek aşağı konfigürasyon için bulunmuş olur.

$\theta_{23}$  ( $\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3$ ) hesaplandıktan sonra,  $\theta_2$ , 21 ve 22 nolu denklemler kullanılarak şu şekilde bulunabilir;

$$\theta_2 = a \tan 2(\cos(\theta_2), \sin(\theta_2)) \quad (25)$$

$$\theta_3 = \theta_{23} - \theta_2 \quad (26)$$

$\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ ,  $\theta_1$  cinsinden bulunduktan sonra,  $\theta_1$ 'in doğru değerini bulmak için dönme matrisi  $\tilde{C}$  kullanılır. 2 no'lu denklemden;

$$(\tilde{C}_0^1 \cdot \tilde{C}_1^2 \cdot \tilde{C}_2^3 \cdot \tilde{C}_3^4)^{-1} \cdot \tilde{C} = \tilde{C}_4^5 \cdot \tilde{C}_5^6 = \tilde{B} \quad (27)$$

elde edilir.

Matris işlemleri yapıldıktan sonra, matrislerin son elemanlarının eşitliğinden;

$$\begin{aligned} &\sin(\theta_1) \cdot (-c_{13} \cdot \cos(\theta_4) - c_{23} \cdot \sin(\theta_4) \cdot \cos(\theta_{23})) \\ &+ \cos(\theta_1) \cdot (c_{23} \cdot \cos(\theta_4) - c_{13} \cdot \sin(\theta_4) \cdot \cos(\theta_{23})) \\ &- c_{33} \cdot \sin(\theta_4) \cdot \sin(\theta_{23}) = 0 \end{aligned}$$

bulunur. Yukarıdaki denklemde bütün açılar  $\theta_1$ 'in cinsinden yazılabildiğinden. Yukarıdaki fonksiyonun kökü, yani  $\theta_1$ 'in doğru değeri, uygun bir sayısal yöntemle bulunabilir.

Bu işlemden sonra,  $\theta_5$  ve  $\theta_6$ , denklem 27'deki matrisin diğer elemanlarının eşitliğinden aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\theta_5 = a \tan 2(-b_{23}, b_{13})$$

$$\theta_6 = a \tan 2(b_{32}, b_{31})$$

Bu denklemlerde,  $b_{xy}$ 'ler  $\tilde{B}$  matrisinin elemanlarıdır.

### iii. Konfigürasyon Kontrolü ve Tekil Konumlar

Ters konum analizindeki işaret belirsizlikleri nedeni ile robotun çözümünde birden fazla konfigürasyon vardır. Bu çözümde iki adet işaret belirsizliği vardır, bunlar;

- Sağ/Sol el konfigürasyonu,
- Dirsek yukarı/aşağı konfigürasyonu.



Sağ/sol el konfigürasyon seçimi, arayüz programında kullanıcıya bırakılmıştır. Bu konfigürasyon seçimi, çözümdeki 20 no'lu denklemde gösterilmiştir. Diğer konfigürasyon ise robotun tasarımcısı tarafından belirlenmiştir. Yapı ve fiziksel nedenlerden dolayı robot dirsek yukarı konumunda çalışmalıdır. Bu seçim ise denklem 24'te görülebilir.

Robotun konum analizinin bazı tekil konumları da vardır [1]. Birinci tekil konum ile robotun  $O_6$  noktası ile  $Z_0$  eksenini çakışır karşılaşırlar. Bu durumda  $\theta_1$  açısı belirlenemez. İkinci tekil konum ile, robottaki  $O_6$  noktası ile  $O_1$  noktası çakışır karşılaşırlar. Bu durumda ise  $\theta_{32}$  açısı belirlenemez. Bu iki tekil konuma da, robotun genel çalışma alanı içerisinde ulaşamayacağından, bu tekil konumlar robot çalışırken bir sorun çıkarmaz.

Robotun en önemli tekil konumu,  $\theta_5=0$  veya  $\theta_5=\pm 180$  iken ortaya çıkar. Bu durumda  $\theta_4$  ve  $\theta_5$  ayrı ayrı çözülemez ve sadece  $\theta_4+\theta_5$  değeri bulunabilir. Böyle bir belirsizliğin ortaya çıkması için hareket planlaması yapılırken  $\theta_5=0$  olmamasına dikkat edilmelidir.

## HIZ VE İVME ANALİZLERİ

### Jacobian Matrisi

Temel olarak bu matris, uzay koordinatlarındaki hız vektörü ile eklem koordinatlarındaki hız vektörü arasındaki dönüşüm matrisidir. Jacobian matrisi denklem 28'da gösterilmiştir.  $J_{AX}$  vektörleri, robotun dönme ( $\tilde{C}$ ) matrisi kullanılarak bulunur.  $J_{PX}$  vektörleri ise  $\bar{P}$  vektörü kullanılarak bulunur  $J_P$  matrisi bulunduktan sonra hız ve ivme analizlerinin her ikisinde de kullanılır [4].

$$J_P = \begin{pmatrix} J_{P1} & J_{P2} & J_{P3} & J_{P4} & J_{P5} & J_{P6} \\ J_{A1} & J_{A2} & J_{A3} & J_{A4} & J_{A5} & J_{A6} \end{pmatrix} \quad (28)$$

Burada,  $J_{Pn}$  ve  $J_{An}$ ,

$$J_{Pn} = \frac{\delta}{\delta q_n} P \quad (29)$$

$$J_{An} = \text{col} \left[ \left( \frac{\delta}{\delta q_n} C \right) \cdot C^T \right] \quad (30)$$

formülleriyle elde edilir [4].

### Hız Analizleri

Verilen eklem konum ve hızları kullanılarak, robotun uç noktasının hızı kolaylıkla bulunabilir.

$$\begin{pmatrix} V_P \\ w_P \end{pmatrix} = J_P \cdot \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{pmatrix} = J_P \cdot \dot{Q} \quad (31)$$

Bu denklemde,

$V_P$  robotun uç noktasının çizgisel hız vektörü,  
 $w_P$  robotun uç işlemcisinin açısal hız vektörü,  
ve  
 $q_X$  x'nci eklem değişkenidir.

$J_P$  matrisi düz ve ters hız analizlerinde kullanılır. Bu denklemler aşağıdaki gibidir;

$$V = J_P \cdot \dot{Q} \quad (32)$$

$$\dot{Q} = J_P^{-1} \cdot V$$

Bu denklem  $\det(J_P) \neq 0$  olduğu sürece geçerlidir;  $\det(J_P) = 0$  olması ise hız ve ivme ile ilintili tekil konumları belirler. Dolayısıyla, konum analizinde olduğu gibi, hız analizinde de bu konumların önceden belirlenmesi, hareket planlamasında bu konumlardan kaçınabilmek için gereklidir. Bu tekil konumlardan en sık rastlanılabilecek olanı, konum analizinde de görülen  $\theta_5=0$  konumudur. Diğer tekil konumlara ise bu robotun öngörülen çalışma bölgesi içinde rastlanılabileceği,  $\det(J_P) = 0$  denkleminin çözümlerine bakılarak görülebilir.

### İvme Analizleri

Robotun verilen eklem konum, hız ve ivme değerleri kullanılarak, robotun uç işlemcisinin ivme vektörü aşağıdaki denklemler aracılığıyla bulunabilir [4].

$$J_P \cdot \ddot{Q} + \dot{J}_P \cdot \dot{Q} = \ddot{V} \quad (33)$$

$$\ddot{Q} = J_P^{-1} \cdot (\ddot{V} - \dot{J}_P \cdot \dot{Q})$$

### YÖRÜNGE PLANLAMA

Robotik uygulamalarında, genel olarak robotun belli bir rota üzerinde gitmesi istenir. Boyama, parlatma ve kaynak gibi bazı özel uygulamalarda, robotun hareketinin daha hassas olması gerekmektedir. Bütün uygulamalarda, robotun geçmesi veya geçmemesi gereken bazı ara noktalar vardır. Bu hareketleri robota yaptırmak için rota planlaması yapılmalıdır.

Rota planlaması yapmak için programcının iki seçeneği vardır. Planlamayı uzay koordinatlarında yada eklem koordinatlarında yapabilir. Endüstriyel robotlar için, eklem koordinatlarında planlama yapmak daha verimlidir, çünkü bu işlem daha hızlı bir işlemdir ve robot daha sarsıntısız ilerler.

### Genel Hususlar

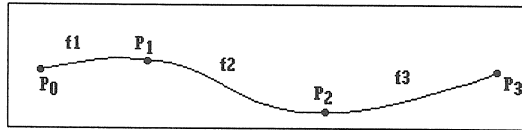
Rota planlaması için, bütün eklem açılarının, konum, hız ve ivmelerinin tanımlanması gerekmektedir. Genel yaklaşım olarak, planlanan fonksiyonun her aralık (iki nokta arası), için güncellenmesidir. Bu planlanan fonksiyon, bütün zaman aralığı için akıcı olmalıdır. Bunun garantilenmesi için, fonksiyonun birinci ve ikinci türevlerinin, ara noktalarda eşit olması gerekmektedir.

Eğer rota üzerinde (n+1) nokta varsa, rota planlaması için (n) tane fonksiyon gerekmektedir. (Şekil 3) kullanıcı, başlangıç noktası ve bitiş noktaları için konum, hız ve ivme tanımlayabilmelidir. Bu, başlangıç ve bitiş noktaları için üçer denklem getirir. Ara noktalar için kullanıcının konum vermesi yeterlidir, fakat akıcılık için her iki taraftaki fonksiyonun hız ve ivme değerlerinin eşit olması gereklidir. Bu da her ara nokta için (4n-4) denklem daha getirir. Bu nedenle, toplam olarak (n) nokta için (4n+2) denklemin sağlanması gerekir.

Bu koşulların sağlanabilmesi için ve nokta sayısı arttıkça gelecek denklemlerin çözülebilmesi için, noktaların arasına uydurulacak en iyi fonksiyon sırası, yani yörünge, 4-3-3-4 yörünge sırasıdır. Bu sırada, ilk ve son aralığa 4. derece fonksiyonlar, aralara ise 3. derece fonksiyonlar uydurulur [3].

### 4-3-4 Yörünge Sırası

Yörünge planlaması, asıl olarak, her eklem için ayrı ayrı yörünge planlamasıdır. Yörüngeyi planlamadan önce, her eklem, her noktadaki konumları ile, başlangıç ve bitiş noktalarındaki hız ve ivmelerinin bulunması gerekmektedir.



Şekil 3. 4 nokta için rota planlaması

Geçilmesi istenen n nokta olduğunu düşünülün. İlk (P<sub>0</sub>) ve ikinci (P<sub>1</sub>) nokta arasındaki fonksiyon parçasının denklemi [3];

$$f_1(t) = A_1 + A_2t + A_3t^2 + A_4t^3 + A_5t^4 \quad (34)$$

Son (P<sub>n</sub>) ve sondan bir önceki (P<sub>n-1</sub>) noktanın arasındaki fonksiyon parçasının denklemi;

$$f_{n-1}(t) = Z_1 + Z_2t + Z_3t^2 + Z_4t^3 + Z_5t^4 \quad (35)$$

Ara noktaların (P<sub>k</sub>, P<sub>k+1</sub>) arasındaki fonksiyon parçalarının denklemi ise;

$$f_k(t) = B_1 + B_2t + B_3t^2 + B_4t^3 \quad (36)$$

olsun. Noktalardaki konum değerleri, şu şekilde verildiğini düşünersek;

$$f_1(0) = P_1, \quad (37)$$

$$f_1(t_1) = P_2, \quad (38)$$

$$f_2(0) = P_2, \quad (39)$$

$$\dots$$

$$f_{n-1}(t_{n-1}) = P_n. \quad (40)$$

burada, t<sub>1</sub>, başlangıç noktasından birinci noktaya gitme süresi ve t<sub>x</sub> ise P<sub>x+1</sub> noktasından P<sub>x</sub> noktasına gitme süresidir.

Bunlara ek olarak, ilk ve son noktaların hız ve ivmeleri de şu şekilde verilmiş olsun;

$$f_1'(0) = P_1' \quad (41)$$

$$f_1''(0) = P_1'' \quad (42)$$

$$f_1'(t_{n-1}) = P_n' \quad (43)$$

$$f_1''(t_{n-1}) = P_n'' \quad (44)$$

Bütün bu koşulları ve verilenleri birleştirirsek, sonucu matris formunda gösterebiliriz;

$$M \times C_f = V \quad (45)$$

Burada, M matrisi, dönüşüm matrisidir. C<sub>f</sub>, fonksiyonların katsayı vektörüdür ve V de konum, hız ve ivmelerin vektörüdür.

### HAREKET KONTROLÜ

Robot üzerinde, daha önce de belirtildiği gibi, altı adet motor vardır. Bu motorlar AC servo motorlardır. Bu motorları sürmek için, servo sürücüler ve transformatör içeren bir elektrik panosu vardır. Bilgisayar ve elektrik panosu arasında bulunan hareket kontrol kartı, Delta-Tau marka motor kontrol kartıdır.

Kart, Delta Tau firmasının Pmac2 hareket kontrol kartıdır. Bu kart ile aynı anda sekiz adet motor simultane bir biçimde sürülebilir. Pmac2 kartı,

başlı başına da kullanılabilir, fakat bu projede bilgisayar yardımı ile motorlar sürülecektir.

#### Motor Kontrol Kartının Kullanımı

Motor kontrol kartını kullanmadan önce, bazı parametrelerin girilmesi ve ayarlanması gerekmektedir. Bu parametreler, motorun ön yükleme parametreleri ve kontrol parametreleridir. Ayrıca her motorun hız ve ivme için limit parametreleri de vardır. Bütün kontrol ve güvenlik parametreleri girildikten sonra, motorlar kontrol için hazırdır.

Kullanıcı, motorları kullanmak için, ekrandan hareket komutlarını girebilir, ya da hareket programını bir matris dosyasına yazarak motor kontrol kartına gönderebilir. Ayrıca kullanıcı, kendi koordinat eksenini de belirleyebilir.

Hareket programlarını yazmak, bilgisayar programı derleyicisine kod yazmaktan daha kolaydır. Aşağıda örnek bir hareket programı vardır. (Şekil 4). Satırların açıklamaları sağ tarafındadır [7, 8].

OPEN PROG 1	; Program 1 başlangıcı
CLEAR	; Hafızadaki bilgilerin sil
LINEAR	; Hareketler lineer modda olsun
TA500	; İvme zamanının 500 ms. olarak ayarlanması
F5000	; Hızın 5000 birim / sn. Olarak ayarla
X10000	; X-Eksenini 1000 noktaya ilerlet
DWELL500	; O konumda ½ sn. dur
X0	; X-Eksenini 0 noktasına gönder
CLOSE	; Programın sonu

Şekil 4. Örnek Hareket Programı

#### Hareket Kontrol Kartına C++ Programı üzerinden Erişmek

Pmac hareket kontrol kartına C++ veya Visual Basic gibi programlarla da erişmek mümkündür. Bu amaç için bir DLL (Dynamic Link Library) kütüphane dosyası mevcuttur. Bu kütüphane dosyası değişik fonksiyonlar içerir. Bu kartın dosyası olan Pmac.dll dosyası içinde yaklaşık 800 fonksiyon vardır. Bu fonksiyonların listesi, bu dll dosyası yardımıyla oluşturulabilecek olan Pmac.def dosyası içinde görülebilir [6][9].

Bu erişim işlemini yapmak için, dll dosyasını önceden bilgisayarın erişimine açan, aşağıdaki satırları (Şekil 5), programın başına eklemek gerekir. Buradaki fonksiyon, kartı kullanıma açar. Fonksiyonun içindeki "dwnum" parametresi, kartın

sıra numarasıdır ve bir kart durumunda bu değer hep "0"dır.

```
HINSTANCE hinstDLL = LoadLibrary ("PMAC.DLL");
void (FAR *lpfnOpenPmacDevice)(DWORD dwDevice);
FARPROC lpfnOpenPmacDevice=GetProcAddress(hinstDLL, "OpenPmacDevice");
```

Şekil 5. Fonksiyonları Tanımlamak için Örnek Kod

Bu kodu yazdıktan sonra, bu fonksiyon, programın içinde herhangi bir yerde, aşağıdaki şekildeki gibi (Şekil 6) çağırılabilir

```
LpfnOpenPmacDevice(0);
```

Şekil 6. Örnek Fonksiyon Çağırma Kodu

Bu kod Pmac kartına bir kanal açar. Kanal açıldıktan sonra diğer fonksiyonlar yardımıyla, robot istenen konuma getirilebilir. Eğer rota planlanmışsa, bu rota kartın anlayabileceği dile çevrilerek bir metin dosyasına, hareket programı olarak yazılır ve karta yüklenir. Bu işlem sonucunda robot harekete başlar ve istenen rotayı takip eder.

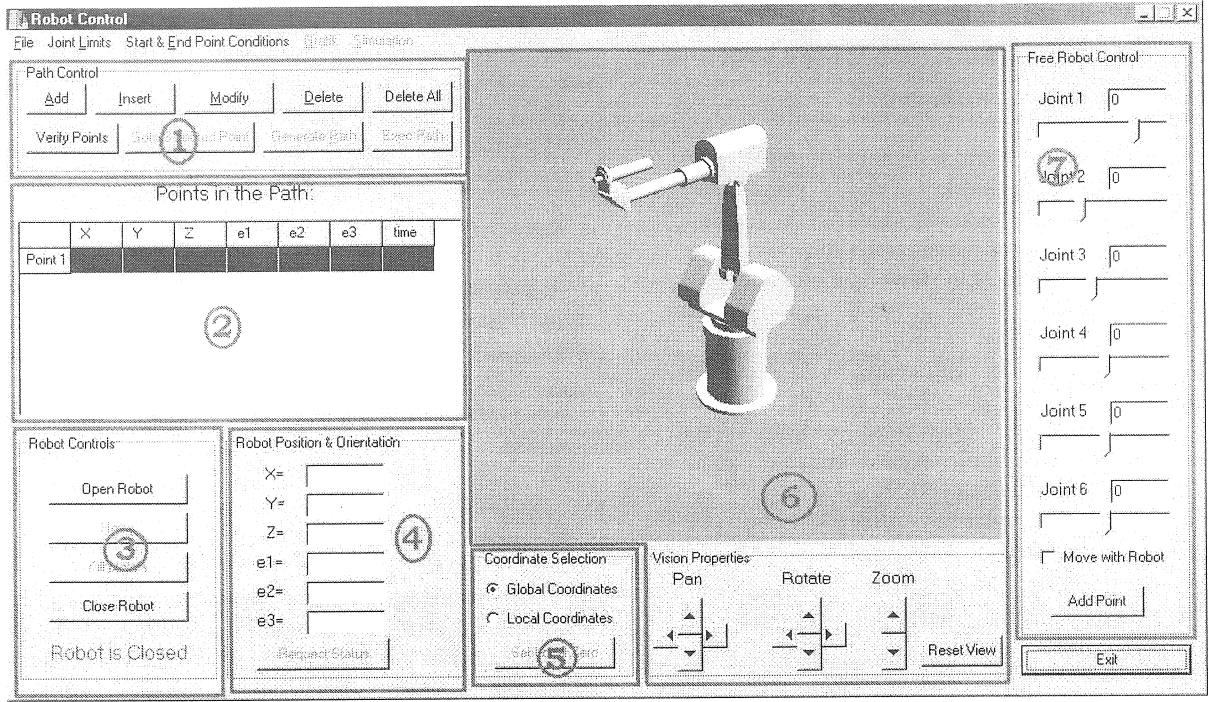
#### ARAYÜZ PROGRAMI

Bu kısımda, arayüz programının uygulaması ve kullanımı anlatılmıştır. Program, robotun simulasyonu ve kontrolünü içermektedir. Bu program sayesinde, robot noktadan noktaya, ya da rota belirlemek suretiyle hareket ettirilebilir [2].

#### Program

Programın asıl amacı, robotu kontrol etmektir. Robot, eklemleri tek tek hareket ettirilerek, ya da uç noktanın konum ve yönelimi verilerek kontrol edilebilir. Her eklem için ayrı ayrı açılarını kontrol etmek suretiyle robotu kontrol etmek, programın bir kısmıdır. Bu tür kontrolde, robot anında hareket ettirilebilir. Kullanıcı robotun eklemlerini ekranda hareket ettirirken, aynı zamanda ekrandaki robot simulasyonu hareket eder. Eğer kullanıcı, robotu da aynı anda hareket ettirmek isterse, ekrandaki "Move with Robot" (Robotla hareket et) seçeneğini işaretlemesi yeterlidir.

Programın ekran görüntüsü aşağıda verilmiştir. (Şekil 7). ekran üzerinde yedi kısım ve ayrıca altı adet de menu seçeneği vardır (Şekil 8).



Şekil 7. Programın Ekran Görüntüsü

### Ekran Kontrolleri

1) Nokta listesindeki noktalar, bu kısımdan ayarlanır. Ayrıca robot istenen noktaya, ya da rotaya buradan gönderilir.

2) Noktalar bu kısımda listelenir.

3) Robotla iletişim bu kısımdan başlatılır, başka bir deyişle, robot buradan açılır ve kapanır. Ayrıca robot park konumuna buradan gönderilir.

4) Uç noktanın gitmesi gereken konum ve yönelim buradan takip edilir, ayrıca robotun o andaki konumu buradan sorgulanır.

5) Bu kısımdan, yerel/evrensel koordinat sistemi seçilir.

6) Bu kısımda robotun üç boyutlu simülasyonu vardır. Robotun o anki konumu ve gideceği noktalar buradan takip edilebilir.

7) Robotun eklem açıları değiştirilerek kontrolü buradan yapılır. Her eklem açısı ayrı ayrı kontrol edilir. İçerisindeki "Add Point" (Nokta Ekle) düğmesi vasıtasıyla, robotun konumu nokta listesine eklenebilir.

### Menu Seçenekleri



Şekil 8. Menu Seçenekleri

1) **File (Dosya):** Buradan, dosya içerisindeki noktalar, nokta listesine aktarılabilir.

2) **Robot Parameters (Robot Parametreleri):** Robot Eklem uzunlukları ve konfigürasyon buradan kontrol edilebilir. Ayrıca robotun ucuna bir aparat takıldığında uzunluğu buradan girilir.

3) **Joint Limits (Eklem Limitleri) :** Buradan, her eklem için, konum, hız ve ivme limitleri belirlenebilir.

4) **Start & End Point Conditions (Başlangıç ve Bitiş Şartları) :** Bu kısım yörünge planlaması içindir. Yörünge başlangıç ve bitiş noktalarında hız ve/veya ivme isteniyorsa, buradan ayarlanabilir.

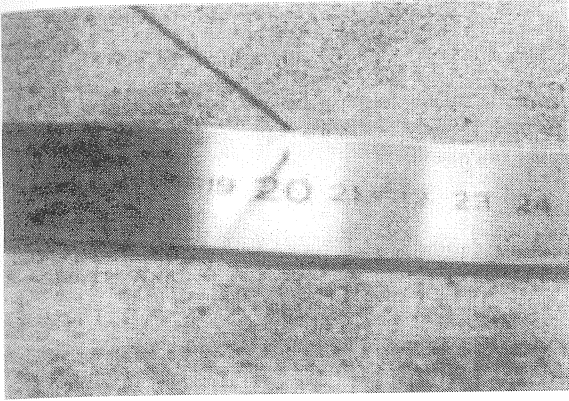
5) **Graphics (Grafik) :** Bu kısım yörünge planlandıktan sonra aktif olur. Bütün eklemlerin konum, hız ve ivme grafikleri ile birlikte, uç noktanın konum, hız ve ivme grafikleri takip edilebilir.

6) **Simulation (Simülasyon) :** Yörünge planlandıktan sonra, robota göndermeden önce kontrol edilmek istenirse, bu düğme sayesinde yörünge ekranda takip edilebilir.

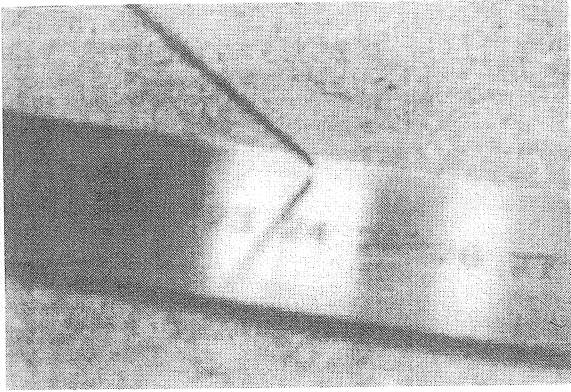
### PERFORMANS ve DEĞERLENDİRME

Program geliştirildikten sonra, robotun ucuna, gittiği noktayı göstermesi amacıyla, ucunda 1 mm çapında tel takılı bulunan bir aparat takılmıştır. Bu aparat sayesinde, robotun uç noktasının hareketi hassas olarak gözlenebilmiştir. Daha sonra robota, bir noktadan diğer noktaya gitmesi için komut verilmiştir. Cetvel üzerinde yapılan bu denemede,

robotun, aparatın hassasiyeti olan 1 mm'nin altında bir doğruluk ile hareket ettiği gözlenmiştir. Aşağıda, robota verilen 4 cm'lik hareket komutunun başlangıcı ve bitiş pozisyonları verilmiştir.



Şekil 9. Hareketin Başlangıcı



Şekil 10. Hareketin Sonu

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu projede, altı serbestlik dereceli bir endüstriyel robot prototipi ve yazılımı, tümüyle yerli olanaklarla geliştirilmiştir. Robot uzay koordinatları kullanılarak, istenen rota için programlanabilmektedir. Bu sayede fabrika otomasyon ortamında, esnek üretim sistemlerinde, tezgah yükleme ve boşaltma işlemlerinde kullanılabilir. Ayrıca taşlama, parlatma gibi uygulamalarda da yararlı olabilecektir. Kaynak ve boya işlemlerini de gerekli teçhizat kullanıldığında yerine getirebilecektir.

Robotun akıllı şekilde çalışabilmesi için kamera aracılığı ile görme tanıma algoritmaları geliştirilmektedir. Bu sayede kendisi gerekli parçaları görerek ve tanıyarak, uzay koordinatları verilmeden işlemler yapma yeteneğine sahip olacaktır.

Ayrıca robot ile beraber çalışacak el, konveyör ve döner tabla tasarım ve imalat çalışmalarını da devam ettirmektedir.

## SOFTWARE DEVELOPMENT FOR MAN-MACHINE INTERFACE FOR AN INDUSTRIAL ROBOT

In this study, a robotic software, which controls a robot, is developed. The robot considered is a six degree of freedom robot and it is designed and manufactured in METU. User can send the robot anywhere in space within its workspace, in any orientation. Forward and inverse kinematics can be executed according to the needs.

Simulation framework is embedded into the software for the 3D visualisation of the robot. Any movements can be simulated on the screen.

Software also generates the path for the given points. Then generated path is simulated on the screen. All position, velocity and acceleration graphics of joints can be examined for the generated path.

Keywords: Industrial robot, kinematic analysis, 3D simulation, path generation.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, Bilgisayar Destekli Tasarım, İmalat ve Robotik (BİLTİR) Merkezine, alet ve cihaz kullanımı için, ve 08-04DPT2001K120980 kod numaralı proje kapsamında DPT ve devam eden YUUP desteği için, teşekkürlerini sunarlar.

## KAYNAKÇA

1. Balkan T., Özgören M. K., Arıkan M. A. S., Baykurt H. M., "A Method of Inverse Kinematics Solution Including Singular and Multiple Configurations for a Class of Robotic Manipulators", Mechanism and Machine Theory, pp.1221-1237, 2000.
2. Cengiz, M. C., "Software Development for Man-Machine Interface for an Industrial Robot", METU Mechanical Engineering Master of Science Thesis, 2003.
3. Konukseven E. İ., "Graphical Simulation and Programming of Robots", METU Mechanical Engineering Master of Science Thesis, 1989.
4. Özgören M. K., "ME 522 Lecture Notes on Principle of Robotics", METU, unpublished 2001.
5. Özgören M. K., "Topological Analysis of 6-joint Serial Manipulators and Their Inverse Kinematic Solutions", Mechanism and Machine Theory, vol.37, No.5, pp.511-548, 2002.
6. "Pcomm32, PMAC 32 Bit Driver" manual, Delta Tau Systems, 2000
7. "Pewin32, PMAC Executive for Windows" manual, Delta Tau Systems, 1995.
8. "PMAC Users Manual", Delta Tau Systems Inc, 1991.
9. Valley, S., "ObjectWindows : Programming Guide", Borland International, 1992.

# YAKIN GELECEKTEKİ KONGRE VE BİLİMSEL ETKİNLİKLER

<u>KONGRE ADI</u>	<u>TARİH</u>	<u>YAZIŞMA ADRESİ</u>
2005 International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing (ICISIP)	04-07 Ocak 2005 Le Royal Meridian Chennai, India	Prof. Palaniswami Marimuthu Dept. of EE Üniv. of Melbourne, Parkville Melbourne, Victoria 3101 Australia +61 3 83446710 +6 3 981 83942 (Fax) Palani@unimelb.edu.au <a href="http://www.icisip.org/2005/">http://www.icisip.org/2005/</a>
2005 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Visual Motion, Evaluation of Tracking Systems (WACV, MOTION, PETS)	05 – 07 Ocak 2005 Beaver Run Resort Breckenridge, CO	Mr. Terrance E. Boulton 1420 Austin Bluffs Parkway CS Dept. Colorado Springs, CO 80933 +1 719 9630573 tboulton@cs.uccs.edu <a href="http://wacv2005.vast.uccs.edu/">http://wacv2005.vast.uccs.edu/</a>
2005 Asia and South Pacific Design Automation Conference ASP-DAC 2005	18-21 Ocak 2005 Shanghai Hotel Equatorial Shanghai, China	Prof. Mengqi Zhou Puhuanli Building No. 13 Rm. 1410 Haidian District Beijing, 100036 CHINA +86 10 6816 0825 +86 10 6823 9572 (fax) mqzhou@public.bta.net.cn <a href="http://aspdac2005.com/">http://aspdac2005.com/</a>
2005 Annual Reliability and Maintainability Symposium-Product Quality & Integrity (RAMS)	24-27 Ocak 2005 Hilton Mark Plaza Alexandria, VA	Mr. V. R. Monshaw Consulting Services 1768 Lark Lane Cerry Hill, NJ 08003 +1 856 428 2342 v.r.monshaw@ieee.org <a href="http://www.rams.org">http://www.rams.org</a>
2005 IEEE 18 <sup>th</sup> International Conference on Micro-electro Mechanical Systems (MEMS)	30 Ocak – 03 Şubat 2005 Fontainebleau Hilton resort Miami Beach, FL	Ms. Katherine K. Cline Preferred Meeting management 307 Laurel st. San Diego, CA 92101 1630 +1 619 232 9499 +1 619 232 0799 (Fax) kkcline@pmmconferences.com <a href="http://www.mems2005.org/">http://www.mems2005.org/</a>
2005 IEEE european Systems Packaging Workshop- (ESPW 2005)	31 Ocak – 2 Şubat 2005 Park Inn Berlin Berlin, Germany	Ms. Christine Kallmayer fraunhofer IZM Gustave-Meyer-Allee 25 13355 Berlin GERMANY +49 30 4640 3288 +49 30 4640 3160 (Fax) kallmayr@izm.fhg.de
2005 IASTED International Conference on Biomedical Engineering (BioMED)	16-18 Şubat 2005 Congress Innsbruck Innsbruck, Austria	Ms. Nadia Leamy +80 4500 16 Ave. NW Calgary, AB T3B 0M6 CANADA +1 403 288 1195 +1 403 247 6851 (Fax) calgary@iasted.org <a href="http://www.iasted.org/conferences/2005/innsbruck/biomed.htm">http://www.iasted.org/conferences/2005/innsbruck/biomed.htm</a>
1 <sup>st</sup> International Conference Micro-and Nano-Technology	9-11 Mart 2005 Vienna, Austria	<a href="http://www.oetg.at/nano05">http://www.oetg.at/nano05</a>

**KONGRE ADI****TARİH****YAZIŞMA ADRESİ**

German-Russian Workshop Numerical Simulation Methods in tribologie: possibilities and limitations	14-17 Mart 2005 Technical University Berlin, Germany	<a href="http://mechanik.tu-berlin.de/popov/seminare-konferenzen/semkon.html">http://mechanik.tu-berlin.de/popov/seminare-konferenzen/semkon.html</a>
First Announcement ICF 11 11th International Conference on Fracture	20-25 Mart 2005 Turin, ITALY,	For more detail information, please refer to the web site <a href="http://www.icf11.com">http://www.icf11.com</a> or contact Professor Alberto Carpinteri ICF11 Chairman c/o Centro Congressi Internazionale s.r.l. Via Cervino, 60 - 10155 Torino, ITALY Tel. + 39 011 2446911 - Fax + 39 011 2446900 E-mail: <a href="mailto:info@congressiefiere.com">info@congressiefiere.com</a>
Engineering Education in XXI, 2 <sup>nd</sup> International Conference	23-29 Mart 2005 Hong Kong, SAR Hong Kong, Hong Kong	Roman Davydov Website: <a href="http://www.afes.info">http://www.afes.info</a> E-mail <a href="mailto:info@afes.info">info@afes.info</a>
Aims for Future of Engineering Science, 6 <sup>th</sup> International Scientific Forum (AFES2005)	24-29 Mart 2005 Hong Kong, China	Roman Davydov Website: <a href="http://www.afes.info-opening">http://www.afes.info-opening</a> September 15 <sup>th</sup> , 2004 E-mail: <a href="mailto:r.davydov@afes.info">r.davydov@afes.info</a>
12 <sup>th</sup> Annual Int'l Conference and Workshop on the Engineering of Computer Based Systems (ECBS 2005)	4-7 Nisan 2005 Washington DC, United States	Jerzy Rozenblit Website: <a href="http://abe.eng.uts.edu.au/ECBS2005/">http://abe.eng.uts.edu.au/ECBS2005/</a> E-mail: <a href="mailto:ecbs05@ece.arizona.edu">ecbs05@ece.arizona.edu</a>
11 <sup>th</sup> International Conference on Sheet Metal	5-8 Nisan 2005	SheMet Conference Office Chair of Manufacturing Technology (LFT) Egerlandstr. 11 91058 Erlangen Germany Tel/Fax: +49 9131 85 -23234 <a href="http://www.lft.uni-erlangen.de/shemet/2005/">http://www.lft.uni-erlangen.de/shemet/2005/</a>
2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)	18-22 Nisan 2005 Catalonia Palace of Congresses Barcelona, Spain	Mr. Joan Aranda Tech. Univ. Of Catalonia Pau Gargallon n. 5, FME Barcelona 08028 SPAIN +34 93 401 6993 +34 93 401 6971 (Fax) <a href="mailto:joan.aranda@upc.es">joan.aranda@upc.es</a>
15 <sup>th</sup> International Conference on WEAR OF MATERIALS	24-28 Nisan 2005 San Diego-USA	Gill Heaton, WOM 2005 Conference Secretariat, Hillside Cottages, Weheatley Road, Islip, Oxford OX5 2TF, UK Tel: +44 (0) 1865 373625 Fax: +44 (0) 1865 375855 E-mail: <a href="mailto:wom-conference@elsevier.com">wom-conference@elsevier.com</a> Website: <a href="http://www.wom-conference.elsevier.com">www.wom-conference.elsevier.com</a>
4 <sup>th</sup> WSEAS Int. Conf. on System Science and Engineering (ICOSSE 2005)	25-27 Nisan 2005 Copacabana, Rio de Janerio, Brazil	Natalia Andrianou Website: <a href="http://www.worldses.org/conferences/2004/brazil/cosse/index.html">http://www.worldses.org/conferences/2004/brazil/cosse/index.html</a> E-mail: <a href="mailto:quick-support@wseas.com">quick-support@wseas.com</a>
Sensor 2005 12 <sup>th</sup> International Trade Fair and Conference	10-12 Mayıs 2005 Nuremberg, Germany	Website: <a href="http://www.sensorfairs.de">http://www.sensorfairs.de</a> E-mail : <a href="mailto:info@sensorfairs.de">info@sensorfairs.de</a>



**KONGRE ADI****TARİH****YAZIŞMA ADRESİ**

2005 4 <sup>th</sup> Asian Conference on Industrial Automation and Robotics (ACIAR 2005)	11-13 Mayıs 2005 Landmark Hotel Bangkok, Thailand	Dr. Nitin Vasant Afzulpurkar ISE, School of Advanced Technologies, Asian Instit. of Technology Bangkok, Pathumthani 12120 THAILAND +66 2 524 5227 +66 2 524 5697 (Fax) nitin@ait.ac.th <a href="http://www.ise.ait.ac.th/aciar2005/">http://www.ise.ait.ac.th/aciar2005/</a>
2005 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference – IMTC 2005	16-19 Mayıs 2005 Fairmont Chateau Laurier Ottawa, ON, Canada	Mr. Robert Myers 799 North Beverly Glen Los Angeles, CA 90077 +1 310 446 8280 +1 310 446 8290 (Fax) bob.myers@ieee.org <a href="http://www.ieee-imtc.org">http://www.ieee-imtc.org</a>
2005 Workshop on Nonlinear Signal & Image Processing (NSIP)	18-20 Mayıs 2005 Sapparo Convention Center Sapporo, Japan	Mr. Akira Taguchi 1-28-1 Tamazutsumi setagaya-ku Tokyo 158-8557 JAPAN +81 3 5707 2161 +81 3 5707 2161 (Fax) ataguchi@sc.musashi-tech.ac.jp <a href="http://www.ice.eng.hokudai.ac.jp/nsip/">http://www.ice.eng.hokudai.ac.jp/nsip/</a>
3 <sup>rd</sup> International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology	23 Mayıs 2005 Ypsilanti, Michigan, United States	Website: <a href="http://www.asme.org/events/fuelcell/">http://www.asme.org/events/fuelcell/</a> E-mail: <a href="mailto:fuelcell@asme.org">fuelcell@asme.org</a>
Tribochemistry NARA 2005	26-27 Mayıs 2005 Nara, Japan	<a href="http://www.crossroad.jp/tribochem2005/">http://www.crossroad.jp/tribochem2005/</a>
International Tribology Conference Kobe 2005	29 May. - 2 Haz. 2005 Japan	Professor Y. Kimura, Vice President, Kagawa University, 1-1 Saiwai-cho Takamatsu 760-8521. Japan. Tel/Fax: +81(0) 87 832 1669 e-mail: <a href="mailto:ykimura@ao.kagawa-u.ac.jp">ykimura@ao.kagawa-u.ac.jp</a>
The International Conference on Recent Advances in Mechanical & Materials Engineering (ICRAMME2005)	30-31 Mayıs 2005 Kuala Lumpur, Malaysia	Assoc.Prof. Dr. İskandar İdris Yaacob Website: <a href="http://www.cnpam.edu.my/conference/icramme2005">http://www.cnpam.edu.my/conference/icramme2005</a> E-mail : <a href="mailto:conference@cnpam.edu.my">conference@cnpam.edu.my</a>
2005 IEEE International Workshop on Safety, Security, & Rescue Robots (SSRR)	6-9 Haziran 2005 Intl. Rescue System Institute Kobe, Japan	Satoshi Tadokoro Intl. Rescue Systems institute 1-5-2 Minatojima-minami, Chuo ku, Kobe, 650 0047 JAPAN +81 78 303 3630 +81 78 303 3631 (Fax) tadokoro@rescuesystem.org <a href="http://www.rescuesystem.org/ssrr2005/">http://www.rescuesystem.org/ssrr2005/</a>
International Research Group on the Wear of Engineering Materials IRG-OACD	13-14 Haziran 2005 Uppsala, Sweden	<a href="http://www2.dem.uc.pt/amilcar.ramalho/irg-oecd/">http://www2.dem.uc.pt/amilcar.ramalho/irg-oecd/</a>
2005 Robotics: Science & Systems (RSS)	8-11 Haziran 2005 MIT – Stata Center A Cambridge, MA	Mr. Sebastian Thrun Stanford University Stanford AI Lab Gates 1A Stanford, CA 94305 9010 +1 650 723 2797 +1 650 725 1449 (Fax) thrun@stanford.edu <a href="http://roboticsconference.org">http://roboticsconference.org</a>



**KONGRE ADI****TARİH****YAZIŞMA ADRESİ**

2005 American Control  
Conference – ACC 2005

8–10 Haziran 2005  
Hilton Hotel  
Portland, OR

Prof. Linda G. Bushnell  
Dept. Of EE Univ. Of Washington Seattle, WA 98195  
+1 206 221 6717  
+1 206 543 3842 (Fax)  
bushnell@ee.washington.edu  
<http://www.ee.washington.edu/con/acc2005/>

2005 IEEE Workshop on  
Advanced Robotics and its Social  
Impacts (ARSO)

12-15 Haziran  
2005  
Nagoya University  
Nagoya, Japan

Toshio Fukuda  
Dept of Micro Nano System Eng Nagoya University Furo cho, Chikusa  
ku Nagoya, JAPAN 464 8603  
+81 52 789 4478  
+81 52 789 3115 (Fax)  
fukuda@mein.nagoya-u.ac.jp  
<http://www.mein.nagoya-u.ac.jp/ARSO2005/>

2005 42<sup>nd</sup> ACM/IEEE Design  
Automation Conference (DAC)

13-17 Haziran  
2005  
Anaheim. CA

Mr. Kevin Lepine  
MP Associates 5405 Spine Rd. – Suite 102 Boulder, CO 80301  
+1 303 530 4333  
+1 303 530 4334 (Fax)  
kevin@dac.com  
<http://www.dac.com>

2005 IEEE Conference on  
Computer Vision and Pattern  
Recognition (CVPR)

20 – 26 Haziran  
2005  
Catamaran Resort  
Hotel San Diego,  
CA

Prof. Martial Hebert  
Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA 15213  
+1 412 268 2585  
+1 412 268 6436 (Fax)  
hebert@ri.cmu.edu  
<http://www.cs.duke.edu/cvpr2005/>

2005 International Symposium on  
Intelligent Control and the 13<sup>th</sup>  
Mediterranean Conference on  
Control Automation

27-29 Haziran  
2005  
Hawaii Grand  
Hotel & Resort  
Limassol. Cyprus

Mr. Marios M. Polycarpou  
75 Kallipoleos PO Box 20537 1678 Nicosia CYPRUS  
+357 22 892252  
+357 22 892260  
mpolycar@ucy.ac.cy  
<http://liu.ece.uic.edu/MED05>

2005 IEEE 20<sup>th</sup> International  
Symposium on Intelligent Control  
(ISIC)

27-29 Haziran  
2005  
Hawaii Grand  
Hotel @ Resort  
Limassol, Cyprus

Mr. Marios M. Polycarpou  
75 Kallipoleos PO Box 20537 Nicosia 1678 CYPRUS  
+357 22 892252  
+357 22 892260  
mpolycar@ucy.ac.cy  
<http://liu.ece.uic.edu/ISIC05/index.html>

2005 International Symposium on  
Computational Intelligence in  
Robotics and Automation-  
(CIRA 2005)

27-30 Haziran  
2005  
Helsinki University  
of Tech.  
Espoo, Finland

Prof. Heikki N. Koivo  
Control Engineering Labng.  
Helsinki Univ. Of Tech. PO Box 5400 Espoo, FIN 02015 HUT  
FINLAND  
+358 9 451 5200  
+358 9 451 5208 (Fax)  
heikki.koivo@hut.fi  
<http://www.control.hut.fi/cira2005/>

2005 IEEE 9<sup>th</sup> International  
Conference on Rehabilitation  
Robotics: Frontiers of the  
Human-Machine Interface  
(ICORR 2005)

20 Haziran – 01  
Temmuz 2005  
Northwestern  
Memorial Hospital  
chicago, IL

Ms. Mary-Ellen Devitt Rehabilitation Institute of chicago 345 E.  
Superior St. Suite 345 E. Superior St. Suite 1436 Chicago, IL 60611  
+1 312 238 2910  
+1 312 238 2208 (Fax)  
medevitt@ric.org  
<http://www.smpp.nwu.edu/ICORR2005/>

KONGRE ADITARİHYAZIŞMA ADRESİ

2005 IEEE Symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS)	18-20 Temmuz 2005 Hotel Giardini Naxos Messina, Italy	Mr. Robert Myers 799 North Beverly Glen Los Angeles, CA 90077 +1 310 446 8280 +1 310 446 8390 (Fax) bob.myers@ieee.org <a href="http://www.ewh.ieee.org/soc/im/vecims/vecims2005">http://www.ewh.ieee.org/soc/im/vecims/vecims2005</a>
2005 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP 2005)	19-21 Temmuz 2005 Burea des Congres Universitaires (BCU) Montreal, QC, Canada	Sebastien Levesque Bureau des Congres Universitaires (BCU) 6600, Cotes des Neiges, 510 Montreal, QC, H3S 2A9 CANADA +1 514 340 3215 +1 514 340 4440 (Fax) isatp@congresbcu.com <a href="http://www.congresbcu.com/isatp05/">http://www.congresbcu.com/isatp05/</a>
2005 International Conference on MEMS, NANO, and Smart Systems	24-29 Temmuz 2005 Banff, AB, Canada	Dr. Wael Badawy Dept. Of Elec. & Comp. Eng. University of Calgary 2500 University of Calgary 2500 University Drive NW Calgary, AB T2N IN4 CANADA +1 403 220 8357 +1 403 282 6855 (Fax) badway@enel.ucalgary.ca badawy@ucalgary.ca <a href="http://www.icmens.org/">http://www.icmens.org/</a>
2005 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2005)	1-2 Ağustos 2005 Shaw Conference Center Edmonton, AB, Canada	Mr. Michael Yu Wang Chinese Univ. Of Hong Kong Dept. Of Automation & Computer-Aided Engr. Shatin, NT HONG KONG +852 2609 8487 +852 2603 6002 (Fax) yuwang@acae.cuhk.edu.hk <a href="http://www.ieee-case.org/">http://www.ieee-case.org/</a> <a href="http://leeds-iyon.insa-iyon.fr">http://leeds-iyon.insa-iyon.fr</a>
32 <sup>nd</sup> Leeds-Iyon Symposium on Tribology	6-9 Eylül 2005 Lyon, France	<a href="http://www.itctribology.org/meetings.html">http://www.itctribology.org/meetings.html</a>
WTC III – The 2005 World Tribology Congress & Exhibition	12-16 Eylül 2005 Washington DC, USA	
2005 ASME International Design Engineering Technical Conferences Twentieth Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise SYMPOSIUM ON THE VIBRATION OF CONTINUOUS SYSTEMS	25-28 Eylül 2005 Long Beach, CA Hyatt regency Long Beach	Robert Parken E-mail: parker.242@osu.edu <a href="http://www.asmeconferences.org/idetc2005/">http://www.asmeconferences.org/idetc2005/</a> *
4th Wseas Int. Conf. on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE '05)	16-18 Aralık 2005 Tenerife, Canary Islands, Spain	Natalia Andrianou Website: <a href="http://www.worldses.org/conferences/2005/tenerife/icosse/index.html">http://www.worldses.org/conferences/2005/tenerife/icosse/index.html</a> E-mail: quick-support@wseas.com
Asiatrib 2006	16-19 Ekim 2006 Kanazawa, Japan	<a href="http://web.kanazawa-u.ac.jp/asiatrib/">http://web.kanazawa-u.ac.jp/asiatrib/</a>

ml

gisi

## MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi'ne yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayımlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kapsamı içinde olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi Yayın Kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilir ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazarına bildirilir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

- Araştırma Makaleleri.
- Uygulama Makaleleri.
- Derleme Makaleleri: Belirli bir konu üzerinde bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri zengin bir kaynakçaya dayanarak aktaran ve bunların değerlendirmesini yapacak nitelikte olmalıdır.
- Çeviri Makaleler: Yerli teknoloji ve bilgi birikimine önemli bir katkıda bulunacak nitelikte olmalıdır.
- Kısa Makaleler: Yapılan bir çalışmayı zaman geçirmeden duyuran veya bu dergide yayımlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.
- Diğer: Yukarıda tanımlanan içerikte olmayan, ancak üyelerimize faydalı olabilecek, imalat ve teknoloji ile ilgili çalışma ve araştırmaların sunulduğu, firma ve kuruluşların teknik özelliklerinin tanıttığı yazılardır.

Hakem değerlendirmesi için makaleler, biri orjinal olmak üzere dört basılmış kopya ile birlikte bir de elektronik kopyası Makina Tasarım ve İmalat Derneği Yayın Kurulu'na bir başvuru formu ile gönderilmelidir. Bu başvuru formu <http://www.me.metu.edu.tr/matim> sayfasından bulunabilir.

Yazarlar, yayımlanma kabulünü takiben makalenin en son halini elektronik ve bir basılmış kopya olarak göndermelidir. Elektronik kopya makalenin basılmış halinin aynısı olmalıdır. Kelime-işlemci olarak Windows işletim sisteminde çalışan MS Word program paketi kullanılmalıdır. Makalenin kaydedildiği disket/CD veya e-mail kullanılan kelime-işlemci paket programı ve sürümü belirtilerek gönderilmelidir.

## MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

### Yazım Dili

Kullanılan dilin olabildiğince basit, anlaşılır ve kesin olmasına özen gösterilmelidir. İleri düzeyde teknik ya da alışılmamış kavramlar kullanmak gerektiğinde, bunlar uygun bir şekilde tanımlanmalı ve yeterince açıklanmalıdır.

### Makalenin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

- Makalenin adı
- Yazar(lar) ad(lar)ı, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il.
- Özet ve anahtar kelimeler
- Makalenin ana kısmı
- Teşekkür (gerekli ise)
- İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler
- Kaynakça
- Ek(ler) varsa

Makalenin adı, olabildiğince kısa, gereksiz ayrıntıdan arınmış olmalı, ancak gerekli anahtar sözcükleri içermelidir.

Yazarların ad ve soyadları, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve bulunduğu il verilmelidir. Ayrıntılı görev ve adres ise ayrı bir kağıtta ve yazarların kısa özgeçmişleri ile birlikte belirtilmelidir.

Özette sadece sonuçlar değil makalenin tümü çok kısa ve öz şekilde açıklanmalıdır. Özet, makalenin konusu, kapsamı ve sonuçları hakkında fikir verebilmeli, ilgili anahtar sözcük ve deyimleri içermelidir. 100 kelimeyi geçmeyen Türkçe özetin ve anahtar sözcüklerin İngilizcesi de konulmalı ve makale başlığının İngilizcesi de mutlaka yazılmalıdır. Bu konuda istenirse dergi Yayın Kurulu yardımcı olabilir.

Makalenin ana kısmında makalenin amacından söz edildikten sonra bir mantık zinciri içinde sorun tanımlanmalı, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

Teşekkür kısmında gerekiyorsa kişi, kuruluş ya da firmalara teşekkür edilebilir. Özellikle firma adlarının bu bölümünün dışında başka bir yerde verilmemesine özen gösterilmelidir.

### Başlıklar

Gerek makalenin yapısını belirlemek, gerekse uzun bölümlerde düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak için üç tür başlık kullanılabilir:

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,
- Alt Başlıklar.

Ana Başlıklar: Bunlar, sıra ile, özet, makalenin ana kısmının bölümleri, teşekkür (varsa), kaynakça, ekler (varsa)'den oluşmaktadır. Ana başlıklar büyük harflerle yazılmalıdır.

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı satırdan devam edilmelidir.

### Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, daktilo ile veya elle anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazı ile belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle daktilo kullanımında "l" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "O" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağıntılar 1 (bir)'den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşitliğin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "( )" içinde verilmelidir.

### Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

Şekiller, küçültme ve basımda sorun yaratmamak için siyah mürekkep ile, düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında aydın ve beyaz bir kağıda çizilmelidir. Her şekil A4 boyutunda ayrı bir sayfada olmalıdır. Şekiller 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şekil altına alt yazılarıyla birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

Resimler parlak sert (yüksek kontrastlı) fotoğraf kağıdına basılmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Özel koşullarda renkli resim baskısı yapılabilecektir.

Çizelge başlıklarının sadece ilk kelimesinin baş harfi büyük harfle, diğer harfleri ve kelimeler küçük harfle yazılmalıdır. Çizelge başlıkları, ayrıca bir sayfada da sıra ile verilmelidir.

### Dip Notu

Dip notu gereken yerlerde bu bir üs numarası 1 ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

### Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [ ] içinde verilmelidir. Dergilerde yayımlanan makaleler, kitaplar, raporlar, tezler, kongre ve sempozyumlarda sunulan makaleler aşağıdaki örneklerde verilen şekilde yazılmalıdır.

- Dergi Makalesi
1. Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376.
- Kitap
2. Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.
- Rapor
3. Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980.
- Kongre Makalesi
4. Adalı, E. ve Tunalı, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

### Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Dergide yayımlanacak makaleler 13 makale sayfasını geçmemelidir. Makaleler daktilo ile A4 kağıdının tek yüzüne, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır. Şekillerin orjinalleri de dahil olmak üzere makale üç kopya gönderilmelidir.

Kabul edilen makaleler dergi için yapılan dizgi ve şekilsel düzenlemeden sonra kontrol için basımdan önce yazarına gönderilir.

Yayımlansın veya yayımlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çeviriden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

### YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.