

**MAKİNA  
TASARIM  
VE  
İMALAT  
DERGİSİ**

*Cilt : 1 Sayı : 1 Eylül 1986*

*m*

*matim*

Makina Mühendisliği Bölümü  
ODTÜ - ANKARA

### Sahibi

Makina Tasarım ve İmalat Derneği

Sorumlu Yayın Yönetmeni

Abdülkadir ERDEN

ODTÜ-MATİMAREN

### Yayın Kurulu

Haluk AKSEL

Ömer Gündüz BİLİR

Abdülkadir ERDEN

Bilgin KAFTANOĞLU

Kemel ÖZGÖREN

Orhan YILDIRIM

ODTÜ-MATİMAREN

ODTÜ-MATİMAREN

ODTÜ-MATİMAREN

ODTÜ-MATİMAREN

ODTÜ-MATİMAREN

ODTÜ-MATİMAREN

### Danışma Kurulu

Sümevir AKÇASU

Mustafa AKKURT

Alpay ANKARA

Özdemir BENGİSU

Ekrem BÖLÜKBAŞ

Mustafa DORUK

Şükrü ER

Nuh ERGENEMAN

Belgin ERKAN

Hadi FEKE

Günay GÜNGEN

Macit KARABAY

Mahmut MUMCUOĞLU

Ziya ÖZKAN

Ömer SAATÇIOĞLU

Arslan SANIR

Ergin TANBERK

Lutfullah ULUKAN

Orhan YEŞİN

Necip YÜKSEL

TÜBİTAK

İTÜ

ODTÜ

DEÜ

ÇİMSATAŞ

ODTÜ

Işık Mak. San. A.Ş.

T. Traktör ve Zir. Mak. A.Ş.

TPAO

T. Şişe ve Cam Fb. A.Ş.

MKEK

ODTÜ

MEPA-RABAK A.Ş.

BMC San. ve Tic. A.Ş.

ODTÜ

HEMA Dişli San. ve Tic. A.Ş.

BİMEL A.Ş.

İTÜ

ODTÜ

BORUSAN Holding A.Ş.

### Yazışma Adresi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi

Makina Mühendisliği Bölümü

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

06531 ANKARA

### Telefon

(41) 23 71 00/2584 /2590/2597

# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt : 1 Sayı : 1 Eylül 1986

JOURNAL OF  
MECHANICAL DESIGN  
AND PRODUCTION  
Vol. 1 No. 1 Sept. 1986

Yılda 4 Sayı yayınlanır

## TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayınlanan bütün yazıların telif hakkı MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ' nindir. Yayınlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayınlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, yayın kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

## ABONE KOŞULLARI

Yıllık 4 sayı için abone bedeli gerçek kişiler için 4.000 TL, firma ve kuruluşlar için 10.000 TL, öğrenciler için 2.000 TL dir. Abone olmak için aşağıda verilen banka hesabına abone bedelinin yatırılması ve açık adresiniz ile banka makbuzunun adresimizi gönderilmesi yeterlidir.

## REKLAM KOŞULLARI

Arka kapak içinde belirtilen Reklam İlkelerine uyması koşulu ile, derginin bu amaçla ayrılan sayfaları firmalara tahsis edilebilir. Bunun için aşağıda verilen banka hesabına tam sayfa için 200.000 TL yatırılması ve banka makbuzu ile yayın kuruluna başvurulması yeterlidir.

## BANKA HESAP NUMARASI

T.İş Bankası  
ODTÜ Şubesi ANKARA  
Hesap No : 6610 - 235339  
(Makina Tasarım ve İmalat Dergisi)

## SUNUŞ

### YAYIN KURULUNDAN

### GENEL DEĞERLENDİRME MAKALELERİ

Temiz Çelik ve Mekanik Özellikleri  
Süleyman SARITAŞ

### ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Metal Şekillendirmenin Sonlu Eleman Yöntemiyle  
Sayısal Benzetimi

A.Erman TEKKAYA

Ağır Şartlarda Kinematik Sürtünme Katsayısının  
Belirlenmesi

Metin AKKÖK

Robot Kolların Zaman ve Enerji Açısından  
Optimal Kontrolü

M.Kemal ÖZGÖREN

Elektro Erozyon ile İşleme (EDM) için  
Yüksek Hızlı Vurum Tanımlayıcı Tasarımı  
Can ÇOĞUN, Abdülkadir ERDEN

### KISA MAKALELER

Takım Tezgahı Etkinliğinin Saptanmasında  
Bir Yaklaşım

Macit KARABAY

Ankastre Kirişte Gerilme Dağılımı

O.Selçuk YAHSİ

### ENDÜSTRİYEL DESTEKLİ PROJELER

### ÖĞRETİM VE EĞİTİM

### KİTAPLAR

Endüstriyel Gürültü Kontrolü

### BİLİMSEL VE TEKNİK TOPLANTILAR

### YENİ ÜRÜNLER

### DERNEK ÜYELERİ

Dizgi : Asuman ERİPEK

Pikaj ve Montaj : Can BERKMEN



SANEM MATBACILIK SAN. TİC. A.Ş.

Tel : 29 65 42 - 30 35 65

Neçatibey Caddesi No:31 Sıhhiye - ANKARA

## SUNUŞ

Ülkelerin gelişme düzeylerinin birbiri ile karşılaştırılmalarında başvurulan ölçütlerden birisinin, ülke araştırmacılarının evrensel teknoloji gelişimine yaptıkları katkı payları olduğu bilinmektedir. Bu katkının göstergesi ise, ulusal ve uluslararası toplantı etkinlikleri, bu toplantılarda sunulan bildirilerin, çeşitli yayın organlarında ve dergilerde yayınlanan makale ve kitapların nitelik ve nicelikleridir. Bu konuda, gelişmekte olan ülkelerle karşılaştırıldığında ülkemizin bilimsel ve teknolojik katkı payının istenen düzeyde olmadığı görülmektedir. Bilinen bu gerçeğe karşın, henüz somut önlemlerin ve yeterli girişimlerin bulunmadığı da izlenmektedir. Türkiye sanayisinin teknolojik düzeyi, eğitim ve öğretim yapımız, ülkemizin ekonomik durumu ve insanlarımızın kişisel ve toplumsal tercihleri, ülke olarak bu konumuzu etkileyen etmenlerden bazılarıdır. Ülkemizin çağdaşlaşması ve Türk sanayisinin teknolojik düzeyinin yükselmesi, bu etmenlerin, teknolojik gelişme olgusu üzerindeki olumlu etkilerinin bileşenidir. Her toplumsal kesimin ve her bireyin, bu konuda üzerine düşen görev ve sorumlulukları bulunmaktadır. Yalın ve yalnız olarak alındığında bu kapsamdaki çabalar etkisiz gibi görünse de bir bütünün mutlak gerekli parçaları olarak, bütün üzerinde önemli etkileri olacaktır. Bu konuda ülke olarak önemli eksikliklerimizden birisinin uzman yayın organları ve toplantıların yeterli sayı ve düzeyde olmaması düşüncesindeyiz. Bu nedenle, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Tasarım ve İmalat Araştırma Merkezi (ODTÜ-MATİMAREN) bünyesinde başlatılan çeşitli çalışmaların Türkiye düzeyinde örgütlenerek süreklilik ve yaygınlaşmasının sağlanması gereği duyuldu. Bu amaçla konularımızın içine giren yayınlar ve toplantılar ile, büyük bir bütünün bir parçasını görev olarak kabul ettik ve başladık. Bu yıl 2. sını düzenlediğimiz Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongreleri ile bu konudaki ilgili kişilerin biraraya gelme ve tartışma gereksinimini karşılamak, elinizde ilk sayısı bulunan **MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ** ile de teknolojik olarak belirli bir düzeyin üzerinde, içerik ve şekil olarak özenle hazırlanmış ve uluslararası ölçütleri sağlayan bir yayın organını sürdürmek düşüncesindeyiz.

Başarılarımızın, kongre, dergi ve diğer etkinliklerimizin, Türkiye düzeyinde ilgili kişi ve kurumlara ulaşması ve yaygınlaşması ile sağlanacağına içtenlikle inanıyoruz.

Saygılarımızla,

Yönetim Kurulu

**Sayın Meslektaşlarımız,**

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi ile, Türkiye'de önemli gördüğümüz bir eksikliği tamamladığımız, sanayileşme ve teknolojik gelişme için önemli gördüğümüz bir temel yapı taşı sağladığımız inancındayız. Dergi duyurusunun yapıldığı Temmuz ayından bu yana gelen mektuplar ve telefonlar bizlerin bu inancını paylaşan çok sayıda meslektaşımızın var olduğunu gösterdi. Gücümüz ve başarı için ümidimiz daha çok arttı. İlginizin sürmesini, eleştirilerinizle bizi yönlendirmenizi diliyoruz ve bekliyoruz.

Yayın kurulu olarak, dergimizin ilk sayısında konuların dağılımı açısından özel bir girişimimiz olmadı. Duyurumuz üzerine gelen makaleleri, dergi arka kapağı iç sayfasında belirtildiği şekilde, değerlendirdik. Her makale, konunun uzmanı en az üç kişi tarafından incelendi, önerilen düzeltmeler yapıldı ve tekrar incelendi. Sonuçta dergi içinde bulacağınız yazılar hazırlandı. Fiziksel yakınlık nedeni ile, makalelerin çoğunluğu ODTÜ öğretim üyelerinden geldi. İlk sayılarda ODTÜ öğretim üyelerinin ağırlığını anlayışla karşılayacağınızı umuyoruz. Diğer kurumlardan ve sanayi kesiminden gelecek bildirimlerin basılması için önemli bir zamana gereksinimimiz var. Bu süreç içinde, bütün üniversite öğretim üyelerinin de sabırlı ve özverili desteklerini beklemekteyiz.

Dergimizin bu sayısında verdiğimiz ana başlıklar ileriki sayılarda da tekrarlanacak. Bu başlıklar altında yayın ilkelerimize uygun her türlü yazı ve duyurularınızı yayımlayabiliriz. Örneğin, Öğretim ve Eğitim sayfalarımız tüm üniversitelere, Yeni Ürünler sayfaları tüm firmalara, Endüstriyel Destekli Projeler sayfaları tüm araştırma kurumlarına açıktır. Ayrıca kongre, dergi, dernek vb., etkinlikleri de, çeşitli aşamalarda ücretsiz olarak duyurmak istiyoruz.

Sayın Meslektaşımız, bu sayı ve önümüzdeki ilk sayıları sadece bir başlangıç, ileriye doğru, daha iyiye doğru bir atılım olarak kabul etmenizi diliyoruz. Çabamız, hep birlikte daha iyiye ulaşmaktır.

Saygılarımızla,

**Yayın Kurulu**

## Temiz Çelik ve Mekanik Özellikleri

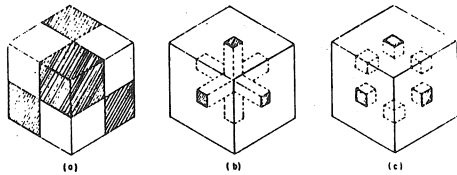
Süleyman SARITAŞ

Doç.Dr.,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Gaziantep Yerleşkesi  
Gaziantep

Dünyada yaşanan enerji krizi Makina Elemanlarının daha üstün dayanımlı çeliklerden imal edilerek ağırlıklarının azaltılmasını gerektirmektedir. Çeliklerin dayanımları arttıkça içlerindeki kalıntıların mekanik özelliklere etkisi daha belirginleşir. Kalıntılar, çelik üretimi sırasında kopan refrakter tuğlaların eriyiğe katılması ve deoksitleme ürünlerinin yüzeye çıkamamalarından oluşurlar. Kalıntıların kimyasal yapısı, şekilleri, büyüklükleri ve miktarları mekanik özelliklere etki eder. Çekme dayanımı çok etkilenmez, ancak süneklik, darbe enerjisi, tokluk ve yorulma dayanımı kalıntı miktarı ve şekline çok bağlıdır. Kalıntıların oluşumu kontrol edilerek mekanik özelliklere kötü etkisi engellenebilir.

### GİRİŞ

Mühendislik malzemelerinin pekçoğu ya imalat yönteminden veya sonraki termo-mekanik işlemlerden dolayı ikinci faz parçacıklar ihtiva ederler. Alaşımın dayanımları, alaşımı oluşturan fazların tipi, miktarı ve aralarındaki bağın gücüne bağlıdır. Belirli fazlardan oluşan bir bütünde, fazların herbirinin dayanımı mikro-yapılarına bağlıdır: Her fazın büyüklüğü (tane büyüklüğü, parçacık büyüklüğü); her fazın dağılımı (dağılmış veya toplu halde, paralel veya rastgele yönlendirilmiş fiberler, devamlı veya devamsız anafaz); her fazın şekli (eşit-eksenli, plaka şeklinde, iğne şeklinde) gibi [1]. Bu fazlar üç boyutlu hacimde iki devamsız fazlar olarak, iki birbirini kesen devamlı fazlar olarak veya bir devamsız faz ikinci devamlı faz içinde gömülü olarak bulunabilirler. Şekil 1'de bu üç ihtimale örnekler gösterilmiştir [2]. Genel durum bu üç



Şekil 1 İki fazlı alaşımların dağılımı [2]: (a) iki devamsız faz, (b) iki devamlı faz, (c) bir devamsız faz ikinci devamlı faz içinde

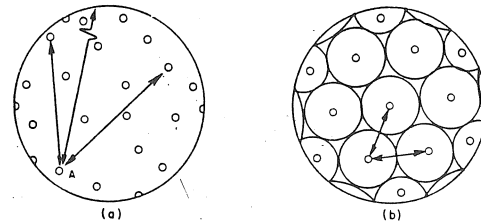
örnekten sonucudur; kalıntılar, karbürler veya metallerarası parçacıklar devamlı bir metal anafaz içinde gömüldürler.

Devamlı faz içinde gömülmüş devamsız fazların hacimsel oranları, (f), ve parçacık büyüklükleri, (d), bağımsız değışkendirler. Birbirleriyle aşağıdaki formüllerle birleştirilebilirler:

$$\text{Ortalama serbest yol} : \lambda = \frac{2d}{3f} (1-f) \quad (1)$$

$$\text{Parçacıklararası uzaklık} : D_s = \sqrt{\frac{2d^2}{3f}} (1-f) \quad (2)$$

Şekil 2 bu formüllerin grafik yorumunu vermektedir.



Şekil 2 Parçacık dağılım ölçümleri [2]: (a) Ortalama serbest yol, (b) parçacıklararası uzaklık

İkinci faz parçacıkların, alaşımların mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili oldukça araştırma yapılmıştır. Bu etkilere inmeden önce ikinci fazların oluşumu, çevrelerindeki gerilme dağılımı ve şekil değiştirme özellikleriyle ilgili bilgi verilecektir.

### İKİNCİ FAZ PARÇACIKLAR

İkinci faz parçacıklar iki gruba ayrılırlar: Kalıntılar ve Metallerarası parçacıklar. Kalıntılar genellikle alaşımın üretimi sırasında oluşurlar. Metallerarası parçacıklar ise genellikle sonradan ısı işlemlerle oluşturulurlar.

#### Kalıntılarn Oluşumu

Normal çelik üretim kalıntıları ya de-oksitleme ürünlerinin (curuflar) yüzeye yüzemelerinden oluşur (iç kalıntılar) ve/veya refrakter tuğlalardan kopan parçaların eriyiğe katılmasıyla oluşur (dış kalıntılar). Dış kalıntılar hem çok büyük hem de kimyasal yapıları çok karışıktır. De-oksitlenmiş çeliğin boşaltılması sırasındaki oksitlenmeden dolayı da büyük kalıntılar oluşabilir.

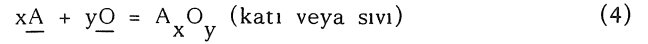
Çelikte oluşan kalıntılarla ilgili ilk önemli yayın Benedicks ve Löfquist [3] tarafından 1930'da yapılmıştır. Öncü çalışmalardan biri de Herty ve arkadaşlarına [4] aittir. Bu konuda pekçok kitap ve bölümler [5-9] yazılmış, derlemeler yapılmış [10-12] ve konferanslar düzenlenmiştir [13-17].

Problemin kaynağı sıvı demir içinde oksijenin % 0.2 miktarında erimesidir. Oksijenin erimesi çeliğin saflaştırılması için faydalıdır. Ancak, Saflaştırılmayı ve elde edilen yapıyı gaz oluşma reaksiyonu kontrol eder:



Altı çizilmiş elemanlar sıvı demirde eriyik halindedirler. Eriyiğin sıcaklığı düştükçe reaksiyon sağ yönde hızlanır. Önlem alınmazsa, potada ve kalıpta CO gazının oluşması kesindir. Bu ise katılaştırılmış

çelikte gaz boşluklarının oluşmasına sebep olur. Alüminyum ve silisyum gibi de-oksitleyici elemanlar katarak gaz oluşmasını engelleyebiliriz. Bu halde eklenen elemanlar eriyikteki oksijeni alarak curuf oluşturur:



Eriyik yüzeyine çıkamayan de-oksitleme ürünleri katı çelik içinde kalıntı oluştururlar.

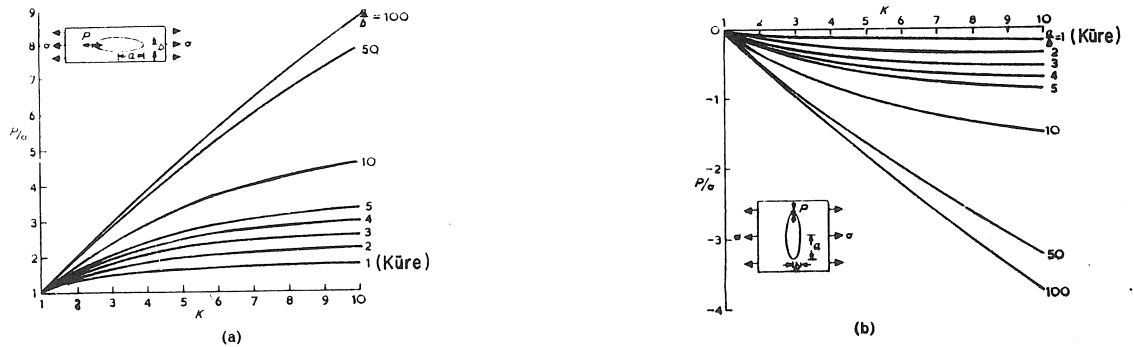
Sülfid tipi kalıntıların kaynağı, demir-çelik üretiminde kullanılan metalurjik koktur. Koktaki kükürt yüksek fırın reaksiyonları sırasında sıvı demir içinde erir ve katılma sırasında özellikle manganez ile birleşerek kalıntı oluşturur.

#### Metallerarası Parçacıkların Oluşumu

Çelik üretimi sırasında oluşan kalıntılar  $1 \mu\text{m}'$  den büyüktür. Özellikle refrakter dış kalıntılar  $100 \mu\text{m}'$  den de büyüktür. Buna karşılık ısı işlemlerle oluşturulan metallerarası parçacıklar genellikle  $1 \mu\text{m}'$  den küçüktür. Çökeltme-yaşlandırma yoluyla alaşımların sertleştirilmesinde oluşan parçacıklar  $1-100 \mu\text{m}$  arasındadır. Nitrürleme, sementasyon gibi yüzey sertleştirme işlemlerinde ve su verme-menevişleme gibi klasik ısı işlemlerde  $0.1-1 \mu\text{m}$  arasında parçacıklar oluşur. Kalıntıların çelik içerisinde varlığı kesinlikle istenmemesine rağmen, metallerarası parçacıklar istenerek oluşturulurlar. Makalenin gerisinde zararlı ikinci faz parçacıklar denince kalıntılar anlaşılacaktır.

#### Kalıntılar Etrafında Gerilme Dağılımı

Elastik bir malzemedeki boşluklar ve delikler etrafındaki gerilme dağılımı Timoshenko [18] tarafından hesaplanmıştır. Bu problemler daha genel hal olan kalıntıların özel bir durumudur. Kalıntılar etrafında oluşan gerilme dağılımı pekçok kişi tarafından [19-22] araştırılmış ve bilhassa fotoelastik modellerle [22] çözüm aranmıştır. Şekil 3'de elipsoid kalıntılar etrafında oluşan gerilme dağılımı verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı gibi kalıntılar etrafındaki gerilme dağılımı kalıntının elastisite modülüne, şekline ve yönüne bağlıdır.



Şekil 3 Elipsoid kalıntılar etrafında gerilme dağılımı [22]. (a) büyük eksen yüke paralel, (b) büyük eksen yüke dik

Kalıntılar, termo-mekanik işlemler sırasında oluşan sıcaklık değişiminden dolayı de etraflarında gerilme dağılımına sebep olabirler. Bu gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımı fotoelastisite tekniği yoluyla Brooksbank ve Andrews [21] tarafından çözülmüştür.

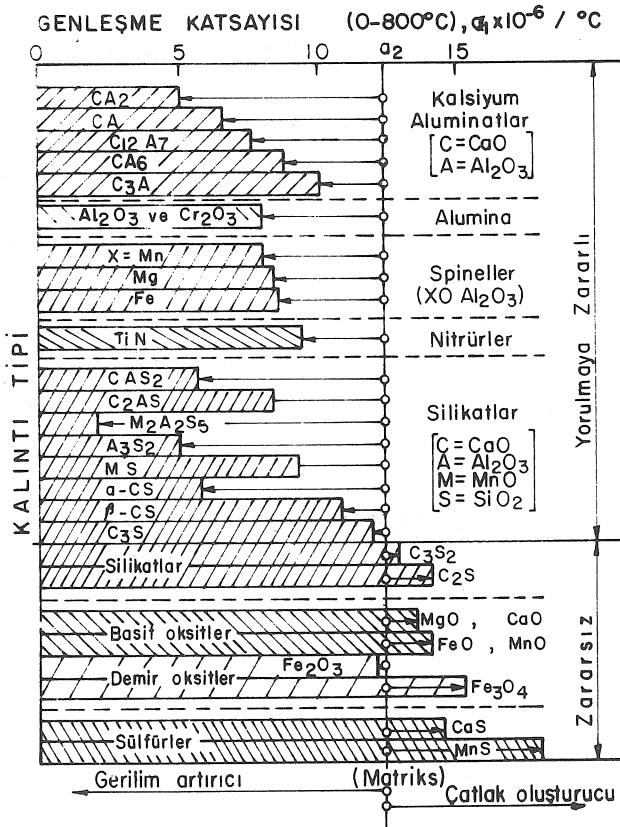
Sıcaklık değişimine bağlı gerilme dağılımı aşağıdaki fonksiyon ile belirlenir.

$$\pm \Phi[(\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T] \quad (5)$$

Burada,  $\Phi$  kalıntı ve matriksin elastisite modülleri, şekilleri, dağılımları ve büyüklüklerinin fonksiyonudur.  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  kalıntı ve matriksin ısı genleşme katsayılarıdır.  $\Delta T$  sıcaklık değişimidir.

Küresel kalıntılarda, eğer kalıntının büzülmesi matriksten az ise ( $\alpha_1 < \alpha_2$ ), kalıntı hidrostatik basınç altında kalır ve matrikste gerilme dağılımına sebep olur. Eğer kalıntı daha büzülürse ( $\alpha_1 > \alpha_2$ ), etrafında boşluk yaratacağından matrikste gerilme dağılımına sebep olmaz. ( $\alpha_2 - \alpha_1$ ) terimi çok önemli olduğundan Şekil 4'te sık rastlanan kalıntıların genleşme katsayıları mukayese edilmiştir.

Kalıntılar etrafında oluşan toplam gerilme dağılımı, uygulanan yükten dolayı oluşan gerilme dağılımı ve sıcaklık değişimi neticesinde oluşan



Şekil 4 Kalıntıların genleşme katsayılarının mukayesesi [21]

gerilme dağılımının toplamıdır. Böylece oluşan en büyük teğet gerilme küresel bir kalıntı için % 10 hata sınırı içinde;

$$\sigma_t = 2\sigma_0 \quad (6)$$

olur. Burada  $\sigma_0$  uygulanan gerilme ve  $\sigma_t$  toplam teğet gerilmedir.

### Sıcak Haddelenme Sırasında Kalıntıların Şekil Değiştirmesi

Çeliklerin sıcak işleme sünekliliklerine kalıntıların kötü etkisi çok iyi bilinmektedir [23]. Çeliğin çatlak oluşmadan işlenmesi genellikle kalıntı miktarına bağlıdır.

Haddelenmiş çelik mamüllerdeki kalıntıların boyutları ve dağılımları onların sıcak işlem sırasındaki şekil değiştirebilmelerine bağlıdır. Kalıntıların çeliğe göre şekil değiştirebilmelerini ölçmek için Malkiewicz ve Rudnik [24] şekil değiştirme indeksi, (V), tarif etmişlerdir.

$$V = \epsilon_k / \epsilon_m \quad (7)$$

burada  $\epsilon_k$  kalıntıdaki birim uzamadır. Kalıntının başlangıçta küresel ve haddelenmeden sonra elipsoid olduğunu kabul edersek; çubuk haddelenme için

$$V = \frac{2 \log b/a}{3 \log A_0/A_1} \quad (8)$$

ve plaka haddelenme için

$$V = \frac{\log b/a}{2 \log h_0/h_1} \quad (9)$$

olur. Burada b ve a elipsoidin büyük ve küçük eksenleri,  $A_0$  ve  $A_1$  haddeden önce ve sonra kesit alanları,  $h_0$  ve  $h_1$  haddeden önce ve sonraki kalınlıklardır.

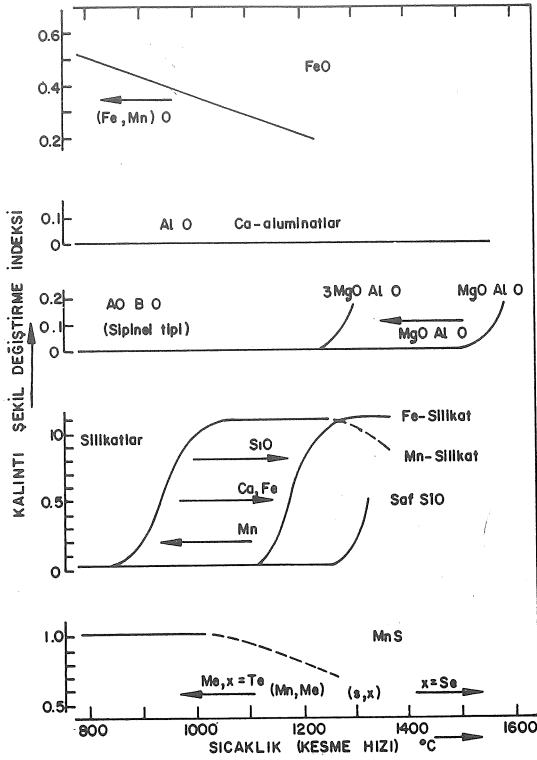
Charles ve arkadaşları [25-26] kalıntı sertliği  $H_k$ 'nin matriks sertliği  $H_m$ 'ye oranı ile V arasında doğru ilişki olduğunu göstermişlerdir.

$$V = 2 - H_k/H_m \quad (0 < V < 2) \quad (10)$$

Pratik olarak sıfır sertlikteki kalıntıların (akışkanlar) V değeri yaklaşık 2'dir. Bu hal silikatlar için çeliğin 1100°C üzerinde haddelenmesinde oluşur. Diğer taraftan,  $H_k = 2 H_m$  iken  $V = 0$ 'dır. Yani kalıntı hiç şekil değiştirmez. Pickering [27] ve Kiessling [8] V'nin kalıntıların kimyasal yapısına ve çalışma sıcaklığına bağlı olduğunu göstermişlerdir (Şekil 5). Kalıntı büyüklüğünün V'ye etkisi kesin olarak açıklığa kavuşmamıştır. V'nin kalıntı büyüklüğü ile arttığı iddia edildiği [24-28] gibi azaldığı [25] veya etkilenmediği [29]'de belirtilmiştir.

Çeliğin haddelenmesi sırasında, kalıntı çeliktan





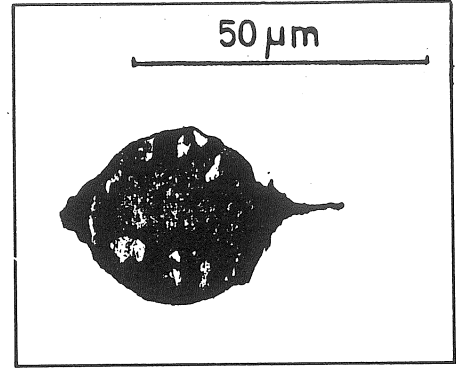
Şekil 5 Sıcaklığın kalıntı şekil değişimine etkisi [8]

az şekil değiştirirse, kalıntı-matriks arasında gerilmeler oluşur ve çatlak veya benzeri devamsızlıklara sebep olabilir (Şekil 6). Çatlak genellikle çeliğin aktığı yöne dik olarak oluşur. Çatlak oluşması için kritik kalıntı büyüklüğü vardır [30] ve Şekil 7'de gösterildiği gibi kritik büyüklük haddeleme miktarına bağlıdır.

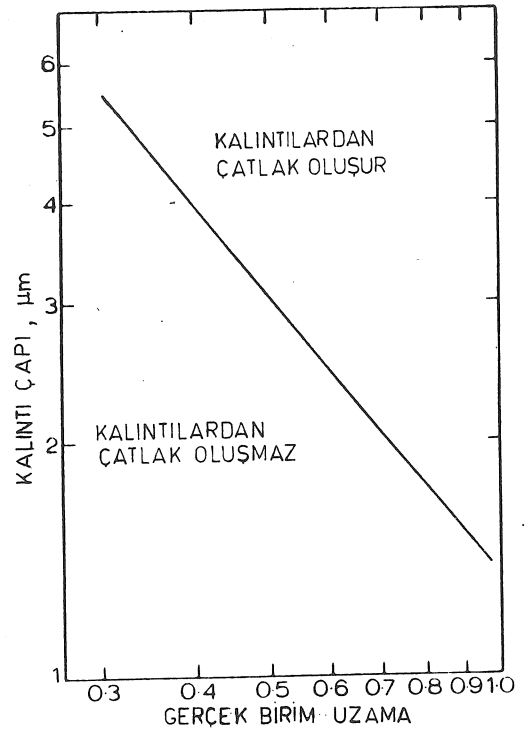
#### Kalıntı-Matriks Bağı ve Arayüzeylerden Çatlama

Çelik içindeki kalıntı/matriks arayüzü düzgün geçişli değildir, kalıntı ve metalde değişik kristal yapılar vardır [31]. Oksit kalıntıları metalden çok serttirler ve mekanik şekil değiştirme sırasında etraflarında gerilmeler oluşur. Brown ve Stobbs[32] % 0.1 plastik birim uzama neticesinde kalıntı/matriks arayüzeylerinden çıkık atılarak gerilmeyegevşemesi olduğunu tesbit etmişlerdir.

Mukavemeti düşürmeden çatlak oluşturan minimum birim uzamayı artırabilmek çok faydalı olacaktır. Fishmeister ve arkadaşları [33]  $Al_2O_3$  yayımlı çeliklerde;  $Al_2O_3$ /metal arasındaki bağın gücünün, oldukça az alaşım elemanı katılarak, büyük miktarlarda değiştirilebileceğini (artı ve eksi yönde) göstermişlerdir. Tanaka ve arkadaşları [34], Eshelby'nin enerji kriterini [35] ve Ashby'nin gerilme kriterini [36] kullanarak küresel kalıntılardan çatlak oluşmasını incelemişlerdir. Gerilme kriterine göre çatlak büyük veya küçük herhangi bir parçacıktan başlayabilir. Diğer taraftan, enerji kriterine göre çatlak önce büyük parçacıklardan başlar.



Şekil 6 Şekil değiştirmeyen kalıntılardan çatlak oluşması [8]



Şekil 7 Çatlak oluşturan kalıntı büyüklüğü [30]

#### KALINTILARIN ÇEKME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

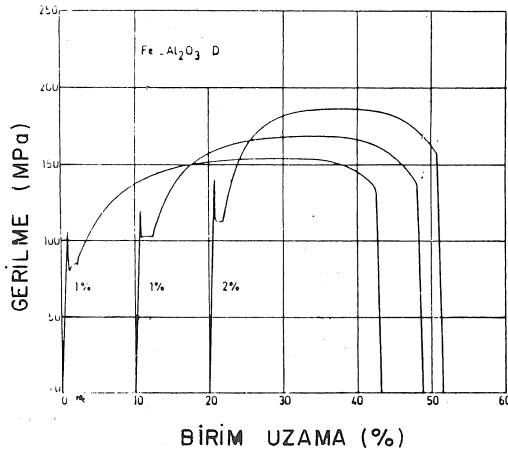
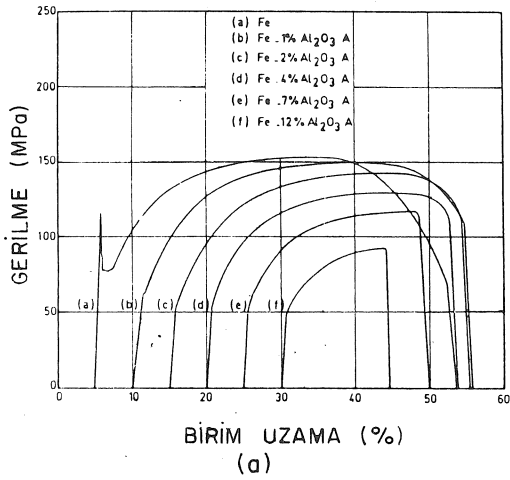
İki fazlı alaşımların mikrodokuları ile akma dayanımları arasındaki ilişkiyi ilk araştıran Gensamer ve arkadaşları [37-38] olmuştur. Tavlanmış, normalize edilmiş ve küreleştirilmiş çelikler üzerinde çalışarak, akma gerilmesinin, ortalama serbest ferrit yolunun logaritmasıyla ters orantılı olduğunu bulmuşlardır. Bu ilişkinin küçük taneciklerle sertleştirilmiş bütün alaşımlar için geçerli olduğu diğer araştırmacılar tarafından da doğrulanmıştır [39-42]

İkinci faz parçacıklarının mekanik özelliklere etkilerini incelemek için Edelson ve Baldwin [2],

ve Roesh ve arkadaşları [43-45] tarafından çok önemli çalışmalar yapılmıştır. Demire toz metalurji yöntemi ile değişik oranlarda sokulan değişik büyüklüklerdeki alumina ( $Al_2O_3$ ) parçacıklarının demirin çekme eğrisine etkisi Şekil 8'de gösterilmiştir [45]. Ortalama tane büyüklüğü  $35 \mu m$  olan alumina parçacıkları yayılma mekanizması yoluyla dayanım artışı yaratmazken,  $0.05 \mu m$  olan alumina parçacıkları yaratmışlardır.

### Elastik Limit

Şekil 8'de görüldüğü gibi büyük alumina parçacıkları alt ve üst akma noktalarını hemen yok ederken, küçük alumina parçacıkları zarar vermişlerdir. Aynı şekilde büyük aluminalar elastik limiti düşürürken, küçük aluminalar yükseltmiştir.



Şekil 8 Demir-alumina kompozitlerinin çekme eğrileri [45]: (a)  $Al_2O_3$  tane büyüklüğü  $35 \mu m$ , (b)  $Al_2O_3$  tane büyüklüğü  $0.05 \mu m$

### İş-Sertleşmesi

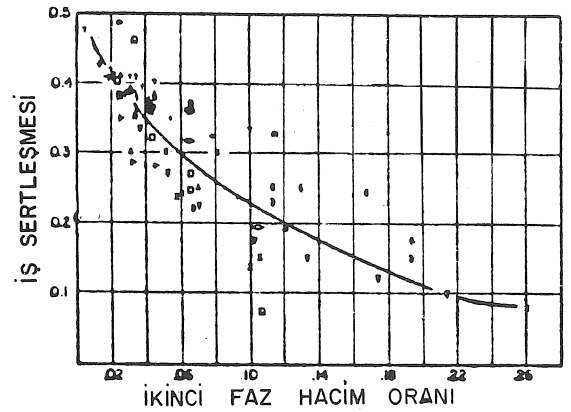
Genelde, ikinci faz parçacıkları iş-sertleşmesinin başlangıcını değiştirirler ve sertleşme hızını düşürür-

ler [2,43-45]. Parçacıklar etrafında boşluk oluşması gerilme gevşemesine izin verir.

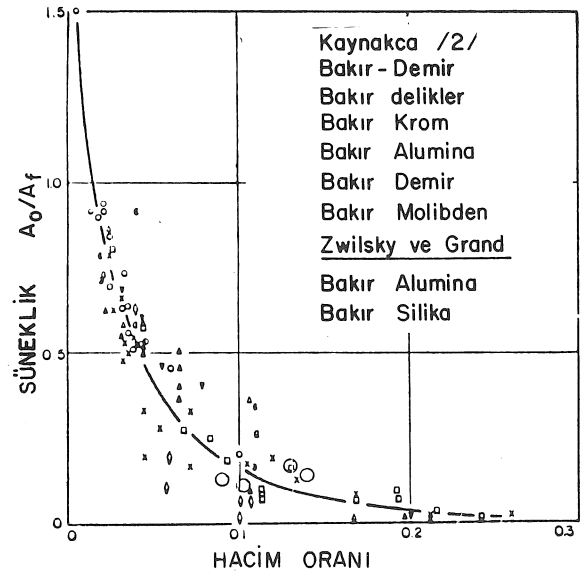
Edelson ve Baldwin'e göre iş-sertleşmesi katsayısı parçacıkların hacim oranlarına bağlıdır (Şekil 9). Roesh ve arkadaşları [45] ince tanecikler için, iş-sertleşme hızının başlangıçta saf demirden daha yüksek olduğunu gözlemişlerdir.

### Süneklik

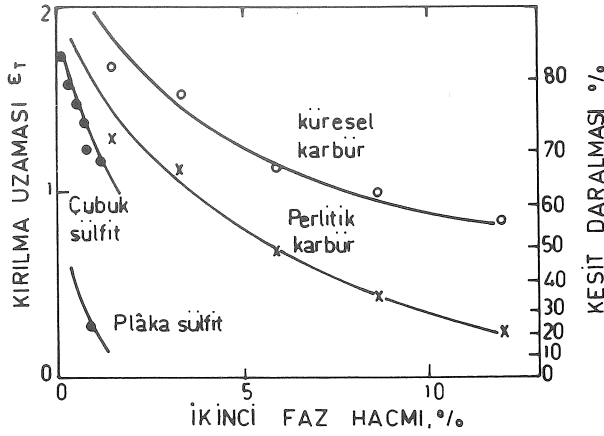
Sünekliğin, parçacık büyüklüğüne bağlı olmaksızın hacim oranı arttıkça azaldığı konusunda bütün araştırmacılar anlaşmaktadırlar [2,41,43-48]. Değişik araştırmacıların, bakır alaşımları ile ilgili ortak değerleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Gladman



Şekil 9 İş-sertleşmesinin ikinci faz miktarıyla değişimi [2]



Şekil 10 Sünekliğin ikinci faz miktarıyla değişimi [2]



Şekil 11 Çeşitli ikinci fazların süneklığe etkisi [46]

ve arkadaşlarına [46] göre ikinci faz parçacıkların şekli de süneklığe etki ederken (Şekil 11), Edelson ve Baldwin [2], ve Roesh ve arkadaşlarına [45] göre şekil önemli değildir.

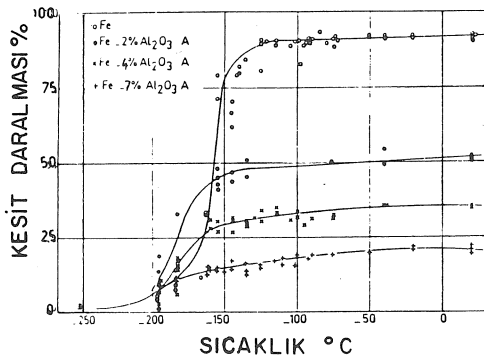
Gurland ve Plateau [47], kalıntıların hacim oranı ( $f$ ) ve kopma uzaması ( $\epsilon_R$ ) arasında ilişki bulmaya uğraşmışlardır. Pekçok uzun formüller geliştirdikten sonra aşağıdaki basit formülün deneysel neticelerle çok iyi uyum içinde olduğunu görmüşlerdir.

$$\epsilon_R = k \frac{1-f}{f} \quad (11)$$

burada  $k$  deneysel bir sabittir.

#### Sünek-Gevrek Geçişi

Kalıntılar, geçiş bölgesini genişletirler ancak sıcaklığını çok değiştirmezler. Şekil 12'de gösterildiği gibi  $-196^\circ\text{C}$ 'de bazı kompozitler saf demirden daha sünektir. % 50 gevrek kırılma sıcaklığı  $-145^\circ\text{C}$ 'den alumina miktarı arttıkça  $-220^\circ\text{C}$ 'ye düşer.

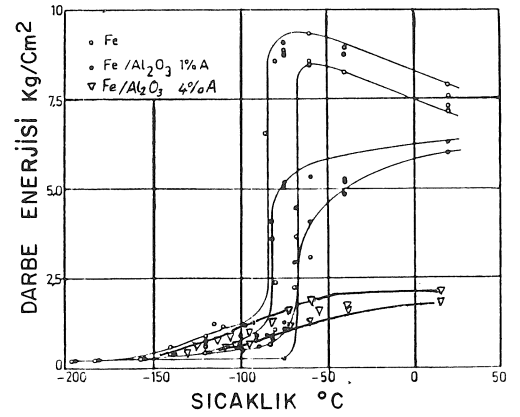


Şekil 12 Demir-alumina kompozitlerinde sünek-gevrek geçişi [45]

#### KALINTILARIN DARBE ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

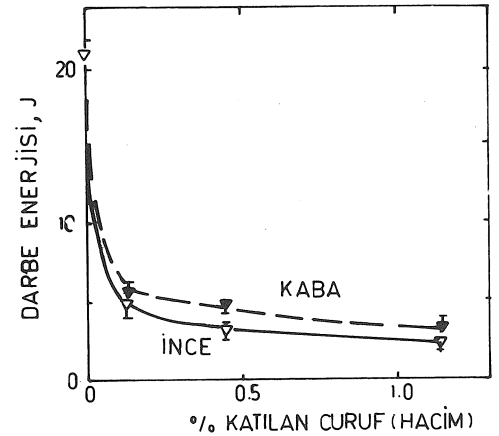
Mikro-çatlakların kalıntılardan başladığı ve özellikle oda sıcaklığında, çatlakların birleşmesi ile sünek kırılmanın meydana geldiği bilinmektedir [1] Diğer taraftan, kalıntılar çatlakın ilerlemesine de etki edebilirler.

Demir-alumina kompozitlerinde darbe enerjisinin alumina miktarına bağlı olarak değişimi Şekil 13'de sunulmuştur [45]. İçine cüruf katılmış toz dövme demir ve çeliklerde darbe enerjisinin değişimi Şekil 14'de verilmiştir [49]. Görüleceği gibi, cüruf miktarı arttıkça darbe enerjisi süratle azalmaktadır. Çok yüksek dayanımlı çeliklerde sülfür kalıntılarının da benzeri etki gösterdiği Seraphin ve Tricot [50] tarafından belirtilmiştir. Pekçok araştırmacı [2,44, 49,50] darbe enerjisinin kalıntıların miktarına



Şekil 13 Demir-alumina kompozitlerinde darbe enerjisi değişimi [45]

43 SIS2541 (ARMCO DEMİRİ)



Şekil 14 Cüruf miktarının darbe enerjisine etkisi [49]

bağlı olduğunu ve bu yönüyle süneklığe benzediğini belirtmektedirler.

### KALINTILARIN YORULMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

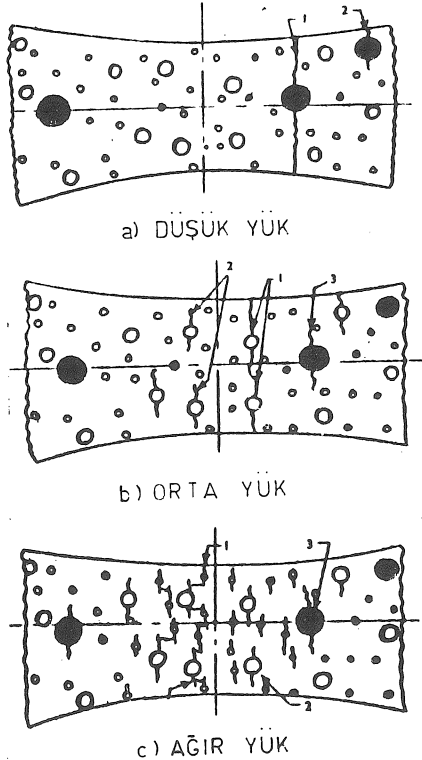
Çeliklerin yorulma özelliklerine kalıntıların etkisi son elli yıl içerisinde gittikçe artan ilgi toplamaktadır [51-70].

İlk araştırmacılarından Swam ve diğerleri [51], ve Stones [52] yaylarda oluşan kırılmaların % 90'ının sebebinin kalıntılar olduğunu göstermişlerdir. Cumings ve arkadaşlarına [54] göre ilk çatlak gerilim seviyesine bağlı olmaksızın daima yüzeydeki büyük kalıntılarda oluşur. Uhrus [56] rulman çeliklerinin ömrünün kalıntıların sayısı ve şekline bağlı olduğunu göstermiştir.

Kalıntıların şekil, büyüklük, miktar, dağılım ve kimyasal bileşimlerinin herbirinin yorulma özelliklerine etki ettiğine dair pek çok deneysel bilgi vardır [51-70]. Bu konuda, Duckworth ve Ineson [57] ve Sumita ve diğerleri [61-65] tarafından sistematik iki çalışma yapılmıştır. Duckworth ve Ineson En24 çeliğine değişik büyüklük ve şekillerdeki alumina ( $Al_2O_3$ ) parçacıklarını döküm yoluyla katmışlardır. Sumita ve diğerleri toz metallurji yöntemi ile daha homojen alumina dağılımı elde ederek yukarıdaki çalışmayı tekrarlamışlardır.

#### Yorulma Çatlağı Başlangıcı

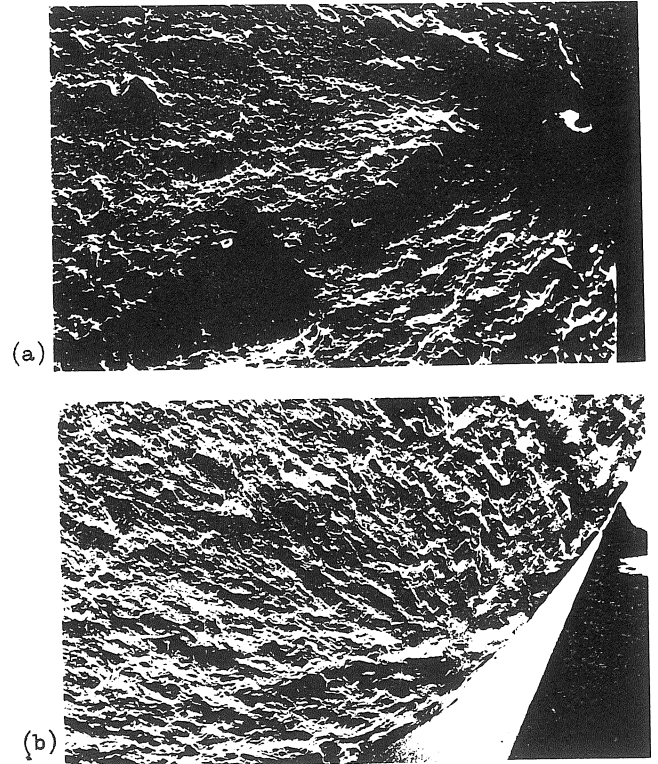
Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi kalıntı-



Şekil 15 Kalıntılardan çatlak başlaması ve kırılma [53]

lar çelik içerisinde gerilme birikimine sebep olurlar. Bu gerilme birikimi kalıntının şekline, uygulanan yüke göre kalıntının yönüne ve kalıntı-çelik elastisite modülleri oranına bağlıdır. Gerilme birikimi küresel kalıntı için 2'den elipsoid kalıntı için 5'in üzerine çıkabilir. Ayrıca çeliğin termo-mekanik işlenmesi esnasında oksit tipi sert kalıntılar etrafında boşluk oluşur. Bu boşluklar bazı hallerde keskin çatlaklar gibi hareket edebilirler.

Şekil 15'de gösterildiği gibi kalıntılardan çatlak başlangıcı Stulen ve diğerleri [53] tarafından izah edilmiştir. Uzun ömür-düşük yük altında, çatlak büyük bir kalıntıda oluşur. Orta yüklerde, küçük kalıntılar da çatlak başlatıp kırılmaya yol açabilirler. Aşırı yüklerde, büyük kalıntılar önemli değildir. Küçük kalıntılarda oluşan sayısız küçük çatlak birleşerek kırılmaya yol açarlar. Duckworth ve Ineson [57] çatlak oluşması için kritik kalıntı büyüklüğünden bahsetmektedirler. Araştırmacılara [57,66,69] göre, kritik kalıntı büyüklüğü yüzeydeki kalıntılar için  $10 \mu m$ 'dir. Yüzeyden  $100 \mu m$  derinlikteki kalıntılar için kritik büyüklük  $30 \mu m$ 'dir. Kalıntının derinliği arttıkça kritik büyüklük artar. Shih ve Araki'ya [66] göre kalıntılardan yorulma çatlağı başlaması üç şekilde oluşabilir: Kalıntının kendisinin parçalanması, kompleks kalıntılarda kendi iç arayüzeylerinin ayrılması veya kalıntı-matriks arayüzeyinin ayrılması. Plastik şekil değiştirmenin zor olduğu malzemelerde, kalıntıların yorulma çatlağı başlatması daha kolaydır [69]. Şekil 16'da kalıntılardan yorulma çatlağı başlamalarına örnek verilmiştir [71].



Şekil 16 Kalıntılardan yorulma çatlağı başlaması [71], Büyütme: X 100, (a) arayüzey ayrılması, (b) parçalanmış kalıntı

## Yorulma Çatlağı İlerlemesi

Kalıntıların yorulma çatlağını hızlandırdıkları iddia edildiği gibi [58], aksine yavaşlattıkları da iddia edilmiştir [72]. Birinci halde, kalıntıların ana çatlaktan ileride küçük çatlaklar oluşturup bunların birleşmesiyle çatlak hızını arttırdıkları iddia edilmiştir. İkinci halde ise, kalıntıların çatlağın keskinliğini azaltarak onu yavaşlattığı belirtilmiştir.

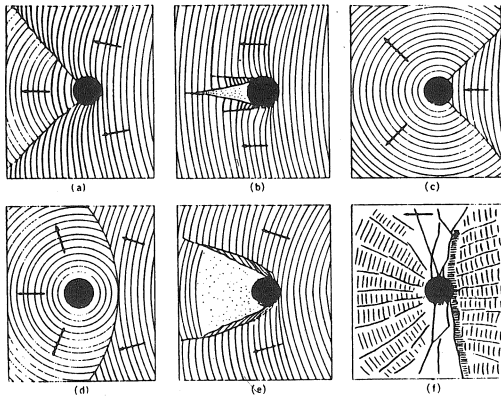
Striasyonlar yorulma çatlağının ilerleme adımlarını ve sadece yorulmuş kırık yüzeylerde görülürler. Sumita ve arkadaşları [61-65], kalıntıların striasyonlara etkilerini incelemişlerdir. Striasyon oluşturarak ilerleyen bir çatlak kalıntılara rastlayınca, striasyonların oluşumunda düzensizlikler meydana gelir (Şekil 17). Çatlağın yaklaşma açısı  $180^{\circ}\text{C}$ 'den büyükse, kalıntı çatlağı yavaşlatır (Şekil 17a ve b). Eğer yaklaşma açısı  $180^{\circ}\text{C}$ 'den küçükse, kalıntı çatlağı hızlandırır (Şekil 17c).

## Yorulma Dayanımı ve Ömrü

Deneyisel neticeler [57-72] göstermektedir ki, çeliğin mekanik işlenmesi sırasında şekil değiştirmeyen sert ve gevşek kalıntılar yorulma için değerlerinden daha tehlikelidir. Şekil değiştirme katsayısı  $V = 1$  olan kalıntı (Şekil 5) yorulma için en az tehlikelidir. Sülfür tipi kalıntıların şekil değiştirme katsayıları yüksektir, mekanik işleme sırasında etraflarında çatlak veya boşluk oluşmaz. Rulman çeliklerinde sülfür kalıntılarının yorulmaya zararlarının olmadığı tesbit edilmiştir [68]. Oksit kalıntılarıyla birlikte bulunmaları halinde onların zararlı etkilerini de azaltırlar.

Oksit tipi kalıntılar yorulmaya zararlıdır. Ancak, en tehlikeli olanları şekil değiştirme katsayıları  $V = 0$  olan kalsiyum-alüminat kalıntılarıdır. Oksit kalıntıların yorulma ömrüne etkisi Şekil 18'de gösterilmiştir [56]. Toz metallurji yoluyla katılan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kalıntıların yorulma dayanımına etkileri Şekil 19'da verilmiştir [65]. Şekilden de görüleceği gibi karışık şekilli alüminalar küresel alüminalardan daha tehlikelidir.

Yorulmaya kalıntıların etkileri özetlenecek

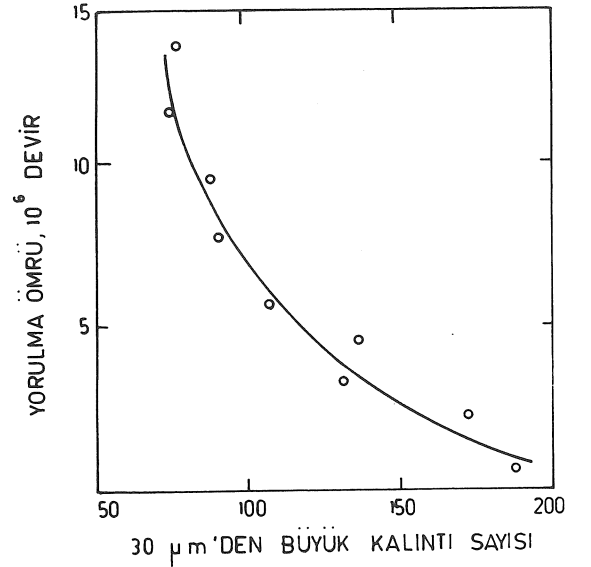


Şekil 17 Kalıntıların yorulma striasyonlarında yarattıkları düzensizlikler [62]

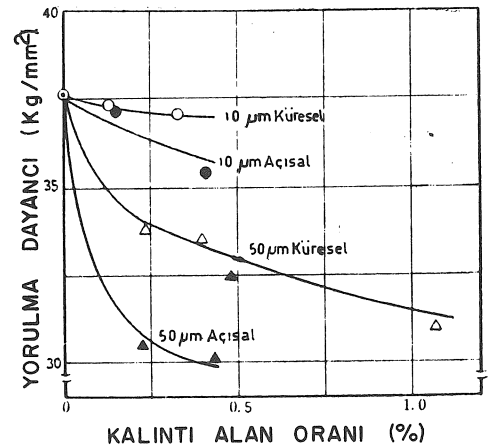
olursa, en önemlisi çatlak başlatmadaki rolleridir. Bir kalıntının yorulma hasarı yaratması için; kritik boyuttan büyük olması, düşük şekil değiştirme katsayısı olması ve düşük ısıl genleşme katsayısı olması gereklidir. Böylece, tehlikeli kalıntılar 10 m' den büyük spineller ve alüminatlardır.

## KALINTI DAĞILIMI TAYİNİ

Temiz çelikte fosfor % 0.035'ten az ve hidrojen ppm (milyonda bir) mertebesinde bulunmalıdır [73]. Oksijen ve kükürt, çelikte daima bulunurlar. Bu iki elementin, 80'li yıllardaki temizlik anlayışı ile, değişik çelik üretim yöntemlerine göre miktarları



Şekil 18 Oksit kalıntıların yorulma ömrüne etkisi [56]



Şekil 19 Alumina kalıntıların yorulma dayanımına etkisi [65]

**Çizelge 1** Değişik Yöntemlerle Üretilen Çeliklerdeki Oksijen ve Kükürt Miktarları [73]

Yöntem	Oksijen (ppm)	Kükürt (ppm)
Endüksiyon	100-150	50-200
Ark	60-100	20-200
AOD	50- 60	50-150
ESR	20- 30	10- 30
VAR	10- 20	50-200

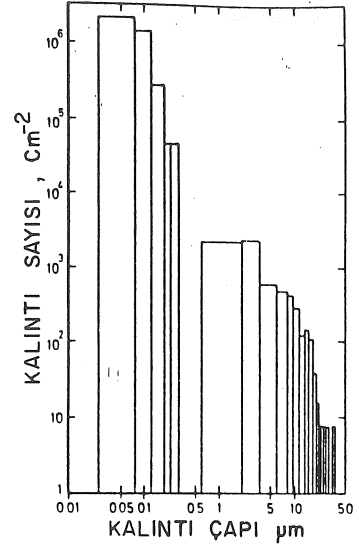
Çizelge 1'de verilmiştir [73]. Toplam oksijen ve kükürt miktarları çeliğin temizliği hakkında bilgi vermesine rağmen, yeteri kadar aydınlatıcı değildir. Kalıntıların sayısı, büyüklüğü ve dağılımı da çok önemlidir. 100 ppm oksijeni olan bir çelikte, eşit büyüklükteki  $Al_2O_3$  kalıntılarının dağılımı teorik olarak hesaplanmış ve Çizelge 2'de verilmiştir. Ticari bir çelikte kalıntılar her büyüklükte oluşur. Silisyumla söndürülmüş 100 ppm oksijeni olan bir çelikteki kalıntı dağılımı Bergh tarafından tesbit edilmiş ve Şekil 20'de gösterilmiştir [74]. Kalıntıların % 98'i 0.2  $\mu m$ 'den küçüktür, fakat bunlar toplam oksijen miktarının sadece % 2'sini oluştururlar. Gayet açıkça görüleceği gibi kalıntıların tamamını indirmek mümkün değildir. Önemli olan kalıntıların dağılımını kontrol etmek ve özellikle kritik büyüklüğün üzerindeki yok etmektir.

**Çizelge 2** 100 ppm Oksijenli Çelikte Eşit Büyüklükteki  $Al_2O_3$  Kalıntılarının Dağılımı [73]

Kalıntı Çapı	Çelik Hacmi /Kalıntı	Kalıntı Miktarı (Adet/ton)	Ortalama Kalıntı Yolu
$10^3$	$1.3 \text{ cm}^3$	$10^4$	1.1 cm
$10^2$	$1.3 \text{ cm}^3$	$10^8$	1.1 cm
10	$1.3 \times 10^6 \mu m^3$	$10^{11}$	110 $\mu m$
1	$1300 \mu m^3$	$10^{14}$	11 $\mu m$
$10^{-1}$	$1.3 \mu m^3$	$10^{17}$	1.1 $\mu m$
$10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-3} \mu m^3$	$10^{20}$	0.11 $\mu m$
$10^{-3}$	$1.3 \times 10^6 A^3$	$10^{23}$	110 $A^0$

### Nitelik Tayini

Kalıntıların kimyasal bileşimini, mevcut fazlarını tayin etmek için pekçok metod vardır. X-ışını kameraları faz ve yapı tayini için en güvenilir araçlardır. Kiessling çelikte oluşan her türlü kalıntının X-ışını fotoğraflarını bir atlas halinde meşhur kitabında [8] vermiştir. X-ışını kameralarının toz malzeme istemesi kalıntıların çelik içerisinde incelenmelerine imkan vermez. Elektron Mikro Probu (EMP) ve analiz imkanı olan SEM ve TEM mikroskopları ile kalıntılar çelik matris içerisinde incelenebilirler. Özellikle EMP ile kalıntıların içinde kimyasal elemanların bölgelere göre dağılımı



**Şekil 20** 100 ppm oksijenli çelikte kalıntı dağılımı [74], (0.5  $\mu m$  civarındaki kopukluk ölçü tekniği değişikliğindedir. Gerçekte yoktur.).

haritası çıkartılabilir ve kalıntıların tarama analizi yapılabilir.

### Nicelik Tayini

Kalıntıların sayısal analizi teknikleri son yıllarda çok gelişme göstermiştir. Fox, J.K., TİMKEN ve ASTM mukayese grafikleri terkedilmektedir. Çünkü, bu grafiklerdeki verilerle mekanik özellikler arasında ilişki kurmak mümkün değildir. Yeni teknikler, doğrudan analiz yoluyla, kalıntıların şekil, büyüklük ve büyüklük dağılımlarını otomatik olarak tayin etmektedir. Otomatik tane analiz aletleri; ışık mikroskobu, video tarayıcı, mikro bilgisayar ve yazıcı-çizici ünitelerinde oluşur [75]. Böyle bir aletle herbiri 0.32 mm olan değişik 500 alanda 1 dakikadan kısa bir sürede kalıntıların dağılımını tayin etmek mümkündür.

### SONUÇ

Her çelik belirli miktarlarda kalıntı ihtiva eder. "Temiz Çelik" deyimi hergün manasını değiştirmektedir. Dünün temiz çeliği, bugün temiz çelik değildir. Ayrıca bir uygulama için temiz kabul edilen çelik, diğer bir uygulama için temiz değildir. Aşırı temizlik maliyeti süratle artırdığı gibi mekanik özelliklerde düzelleme yaratmayabilir. Önemli olan, kalıntıların oluşumunu kontrol ederek onların zararlı etkilerini azaltmaktır.

## CLEAN STEEL AND ITS MECHANICAL PROPERTIES

World energy crisis requires that machine elements should be produced from stronger steels to reduce their weights. As the strength of the steels increases, the influence of non-metallic inclusions on their mechanical properties dominates. Inclusions are either entrapped refractory bricks or deoxidation products that fail to float out.

Mechanical properties of the steel are affected by; chemical composition, shape, size and amount of the non-metallic inclusions. Tensile strength is not affected too much; but ductility, impact energy, toughness and fatigue strength are very much dependent on the amount and shape of inclusions. By controlling the occurrence of non-metallic inclusions during steel production, their bad effects can be eliminated.

## KAYNAKÇA

- 1 Gurland, J. ve Parikh, N.M., *Fracture*, 8, (1972), 841.
- 2 Edelson, B.I. ve Baldwin, W.M., *Trans. ASME*, 55, 230, 1962.
- 3 Benedicks, C. ve Löfquist, H., *Non-Metallic Inclusions in Iron and Steel*, Chapman and Hall, London, 1930.
- 4 Herty, C.H., *Deoxidation of Steel*, A Memorial Volume, AIME, New York, 1957.
- 5 Türkdoğan, E.T., *BOF Steelmaking*, Vol.2, Chapter 4, AIME, New York, 1975.
- 6 Derge, G., *Basic Open Hearth Steelmaking*, Chapter 12, AIME, New York 1964.
- 7 Baeyartz, M., *Non-Metallic Inclusions in Steel*, ASM, Ohio, 1947.
- 8 Kiessling, R. and Lange, N., *Non-Metallic Inclusions in Steel*, Parts I-IV, The Metal Society, London, 1978.
- 9 Pickering, F.B., *Inclusions*, The Institution of Metallurgist, London, 1979.
- 10 Sims, C.E., *Trans. AIME*, 215, (1959), 367.
- 11 Türkdoğan, E.T., *Chemical Metallurgy of Iron and Steel*, 153, The Iron and Steel Institute, London, 1973.
- 12 Van Vlack, L.H., *Oxide Inclusions in Steel*, Review 220, Int. Metals Reviews, 187, 1977.
- 13 *Clean Steel*, The Iron and Steel Institute, London, 1963.
- 14 *Clean Steel*, Royal Swedish Academy of Engineering, Stockholm, 1971.
- 15 *Production and Application of Clean Steels*, The Iron and Steel Institute, London, 1972.
- 16 *Sulphide Inclusions in Steel*, ASM, Ohio, 1974.
- 17 *Symp. on Non-Metallic Inclusions in Steel*, Swedish Ins. For Metal Research, Stockholm, 1981.
- 18 Timeshenko, S., *Strength of Materials*, Vol.2, 616, 1970.
- 19 Goodier, N.J., *J.App. Mech.*, *Trans. ASME*, 55, (1933), A39.
- 20 Sadowsky, M.A. ve Sternberg, E., age, 69, (1947). A191.
- 21 Booksbank, D. ve Andrews, K.W., *Prod. Appl. Clean Steel*, (1972), 186.
- 22 Edmonds, D.V. ve Beevers, C.J., *J. Mat. Sci.*, 3, (1968), 457.
- 23 Sellars, C.M. ve Tegart McG., W.J., *Int. Met. Rev.*, 17, (1972), 1.
- 24 Malkiewicz, T. ve Rudnik, S., *JISI*, 201, (1963), 33.
- 25 Charles, J.A., *Con. on Inclusions and Their Effects on Steel Properties*, University of Leeds, BSC, 1974.
- 26 Gove, K.B. ve Charles, J.A., *Met. Tech.*, 1, (1974), 425.
- 27 Pickering, F.B., *JISI*, 188, (1958), 148.
- 28 Iwai, H. ve diğerleri, *Tetsu-to-Hagane*, 55, (1969), 887.
- 29 Ekerot, S., *AIME Fall Meeting on Inclusions in Steels*, 1970.
- 30 Klevebring, B.I. ve diğerleri, *Met. Trans*, 6A, (1975), 319.
- 31 Easterling, K.E. ve diğerleri, *P/M*, 16, (1973), 31, 128.
- 32 Brown, L.M. ve Stobbs, W.M., *Phil. Mag.*, 23, (1971), 1185.
- 33 Fischmeister, H.F. ve diğerleri, *Met. Sci.*, J., 6, (1972), 211.
- 34 Tanaka, K. ve diğerleri, *Phil. Mag.*, 21, (1970), 267.
- 35 Eshelby, J.D., *Proc. Roy. Soc.*, A241, (1957), 376.
- 36 Ashby, M.F., *Phil. Mag.*, 14, (1966), 1157.
- 37 Gensamer, M. ve diğerleri, *ASM Trans.*, 28, (1940), 380.
- 38 a.g.e., 30, (1942), 983.
- 39 Turkalo, A.M. ve Low, J.R., *Trans. AIME*, 212, (1958), 750.
- 40 Starr, C.D. ve diğerleri, *Trans. ASM*, 46, (1954), 1075.
- 41 Liu, C.T. ve Gurland, J., *Trans. AIME*, 242, (1968), 1535.
- 42 Gurland, J. ve Bardzil, P., a.g.e., 203, (1955), 311.
- 43 Roesh, L. ve diğerleri, *Mem. Sci. Rev. Metall.*, 63, (1966), 11, 927.
- 44 a.g.e., 941.
- 45 a.g.e., 66, (1969), 1,29.
- 46 Gladman, T. ve diğerleri, *Effect of Second Phase Particles on Mech. Prop. of Steel*, ISI, 68, 1971.
- 47 Gurland, J. ve Plateau, J., *Trans. ASM*, 56, (1963), 442.
- 48 Saritaş, S. ve diğerleri, *P/M*, 3, (1981), 131.
- 49 Bockstiegel, G. ve Blande, C.C., *4th Euro. Sym P/M*, 3, (1976), 21.
- 50 Seraphin, L.G. ve Tricot, R.H., *Sulphide Inclusions in Steels*, ASM, Ohio, 338, 1974.
- 51 Swam, A. ve diğerleri, *Engineering*, 27, (1931), 314.
- 52 Stones, F., *The Iron Age*, 12, (1931), 4, 154.
- 53 Stulen, F.B. ve diğerleri, *Fatigue of Metals*, 439, 1956.
- 54 Cumming, H.N. ve diğerleri, *Trans. ASM*, 49, (1957), 482.
- 55 Murray, J.D. ve Johnson, R.F., *Clean Steel*, ISI Spec. Rep. 77, (1963), 110.
- 56 Uhrus, L.O. age, 104.
- 57 Duckworth, W.E. ve Nelson, E., age, 87.
- 58 Pelloux, R.M.N., *Trans ASM*, 57, (1964), 511.
- 59 Broek, D., *Proc. Int. Con. on Fracture*, 754, 1969.
- 60 Andrews, K.W., *Iron and Steel*, (1970), 89.
- 61 Sumita, M. ve diğerleri, *TNRIM*, 11, (1969), 6, 14.
- 62 age, 14, (1972), 4, 12.
- 63 age, 15, (1973), 1, 1.
- 64 age, 17, (1975), 3, 14.
- 65 Sumita, M. ve diğerleri, *Trans. ISIJ*, 14, (1974), 275.
- 66 Shih, T.Y. ve Araki, T., age, 13, (1973), 11.
- 67 Tricot, T., *Prod. Appl. Clean Steel*, ISI Spec. Rep. 134, (1972), 199.
- 68 Enekes, S. age, 215.
- 69 Castagne, J.L. ve diğerleri, age, 221.
- 70 Frost, N.E., *J. Mech. and Phys. Solids*, 9, (1961), 143.
- 71 Saritaş, S. ve Davies, T.J., *P/M-84 Int. Con.*, Toronto, 1981.
- 72 Mc Evily, A.J., *NASA TDD-328*, 1962.
- 73 Kiessling, R., *Symp. on Non-Metallic Inclusions*, Swedish Inst For Metal Research, 7, 1981.
- 74 Berg, S., *Jernkontorets Ann.*, 146, (1962), 748.
- 75 Hougardy, H.P., *Microscope*, 24, (1976), 7.

## Metal Şekillendirmenin Sonlu Eleman Yöntemiyle Sayısal Benzetimi

A.Erman TEKKAYA

Y.Doç.Dr.,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Ankara

Metal şekillendirmenin bir üretim seçeneği olarak öneminin artması, bu konuda etkin kuramsal çözümleme yöntemlerinin gereksinimini doğurmuştur. Bu bildirinin ilk bölümünde, metal şekillendirme işleminin sayısal benzetimini amaçlayan bir sonlu elemanlar yaklaşımının temelleri tanıtılacaktır. Yöntem hayali yer değiştirmeleri ilkesinin zamana göre olan değişim şekline dayanmakta ve her türlü doğrusal olmayan kinematik öğeleri içermektedir. Malzemenin elastik-plastik şekil değişimini tanımlayan genelleştirilmiş Prandtl-Reuss bağıntıları kullanılmıştır. Bildirinin ikinci bölümünde ise, bu şekilde geliştirilen sonlu elemanlar yönteminin değerlendirilmesi verilmiştir. Bu amaçla gerek kuramsal gerekse deneysel karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalardan elde edilen uyum tatminkardır.

### GİRİŞ

Üretim sektöründe metal şekillendirme işlemleri giderek önem kazanmaktadır. Talaşlı üretim yöntemleriyle elde edilen birçok parçalar bugün metal şekillendirme yöntemleri ile yapılabilmektedir. Bu yöntemle yapılan üretimin üç önemli üstünlüğü vardır:

1. Talaş kaldırılmadığından, malzemeden büyük kazanç sağlanmaktadır. Bu özellikle pahalı ve yüksek kaliteli metallerde (örneğin: tantal,titan,vs.) önem kazanmaktadır.

2. Üretim verimi çok yüksektir. Dakikada 60-80 parça üretimi günümüz teknolojisinde olağan sayılan bir verimdir.

3. Üretilen parçalar dayanım ve yorulma ömürleri açısından çok olumlu özellikler taşımaktadırlar. Bu olgu malzemenin üretim sırasında pekleşmesinden ve talaşlı üretim yöntemlerinde olduğu gibi, yüzeylerinin zedelenmemesinden kaynaklanmaktadır.

Tüm bu olumlu yanlarına rağmen metal şekillendirme teknolojisi, halen uzun yılları kapsayan deneyimlerin sahibi uzmanlaşmış kişiler tarafından üretilebilmektedir. Türkiye'de bu konuda (özellikle

"soğuk iş" diye anılan oda sıcaklığında yapılan metal şekillendirme işlemlerinde) bir teknoloji- "üretimine" ulaşılmamış olması da yukarıda değinilen nedenden kaynaklanmaktadır. Zira bu tür teknolojilerde deneyim kazanarak uzmanlaşmak büyük yatırımlar ve zaman isteyen bir olgudur.

Bu sorunun temelinde, yakın bir geçmişe kadar, metal şekillendirme işlemlerinin çözümlemesinde ve planlamasında sonuç alıcı kuramsal hesaplama yöntemlerinin eksikliği bulunmaktadır. Bu eksiklik, metal şekillendirmeyi tanımlayan sürekli ortam mekaniği ve malzeme kanunları uygulandığında, bir insan tarafından çözülemeyecek kadar çok, karmaşık ve zor matematiksel işlemlerin doğmasından oluşmuştur. Ancak bilgisayarların ve bunlara uyarlanmış sayısal yöntemlerin gelişmesi ile söz edilen problemin çözülme umudu belirmiştir. Hatta 1986 yılında satışına başlanan yeni nesil, çok hızlı çalışan (~ 3 Gigaflop işlem hızlı) bilgisayarların sayesinde bazı endüstriyel uygulamalara güncel teknoloji içinde olanak sağlanmıştır.

1965'lerden başlayarak, metal şekillendirmeyi incelemek için geliştirilen değişik sayısal yöntemler içinde en başarılısı Sonlu-Elementler-Yöntemi (SEY) olmuştur.Günümüzde SEY ile bir metal şekillendirme



işleminin tümüyle gerçeğe uygun sayısal benzetimi ("process-simulation") mümkündür. SEY'in gelişmesini içeren kapsamlı bir çalışma daha önce yayınlanmıştı [1].

Bu bildirinin amacı, yazar tarafından geliştirilen bir SEY uygulamasının tanıtılmasıdır. Aşağıdaki bölümde bu uygulamanın kuramsal temelleri, bunu takip eden bölümde ise elde edilen yazılımın değerlendirilmesi sunulacaktır.

## SONLU ELEMAN YÖNTEMİNİN (SEY) KURAMSAL TEMELLERİ

Geliştirilen SEY'in kuramsal temelleri üç bölümde işlenecektir:

**Mekanik Temeller:** Bu bölümde yöntemin çıkış noktası olan değişim denklemi elde edilecektir.

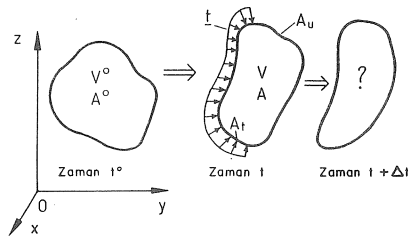
**Malzeme Kanunu:** Değişim ilkesinde kullanılacak malzeme denklemleri tanıtılacaktır.

**Sayısal Çözüm:** İlk iki bölümden ortaya çıkan matematiksel denklemlerin sayısal çözümü tanıtılacaktır.

Tüm çalışmada, her türlü ısı etkileri ihmal edilmiş ve şekillendirme işleminin normal oda sıcaklığında yapıldığı ("soğuk iş") varsayılmaktadır.

### Mekanik Temeller

Bir cismin  $t^0$  ve  $t$  zamanlarındaki başlangıç ve son konumları Şekil 1'de gösterilmiştir. Burada,  $A$ , cismin yüzey alanı,  $V$ , cismin hacmi,  $\mathbf{t}$  vektörü<sup>1</sup> cismin  $A_t$  alanında etki eden dış kuvvet (birim alan üzerine düşen) ve  $A_u$  cismin yüzeyinde yer değiştirmelerin bilindiği alandır. Cismin bu iki konumu arasındaki tüm konumların bilindiği varsayılmaktadır.



Şekil 1 Bir cismin şekil değiştirme kinematiki

<sup>1</sup> Bu bildiride kullanılan matematiksel yazılım şekli diyadiktir. Buna göre koyu basılmış küçük bir harf, örneğin  $\mathbf{t}$  bir vektörü temsil etmektedir; koyu basılmış büyük bir harf, örneğin  $\mathbf{T}$ , bir ikinci derece tensörünü temsil etmektedir. Einstein'in tensörel notasyonu ile verilen diyadlar

$$\mathbf{T} = T_{ij} \quad \text{ve} \quad \mathbf{t} = t_i \quad i, j = 1, 2, 3$$

şekillerini almaktadırlar. Diyadik yazılım şeklinin Einstein'in tensörel notasyonuna kıyasla üstünlüğü, karmaşık bağlantıların daha basit şekilde ifade edilebilmesi ve bu bağlantıların aynı zamanda konvektif koordinat sistemleri içinde geçerliliklerini korumalarıdır.

Amaç cismin  $t + \Delta t$  zamanındaki konumunu (ve tabii ki şeklini) bulmaktır. Bu amaca ulaşmak için son konum göz önüne alınacaktır. Bu konumdaki denge denklemleri hayali yerdeğiştirmeleri ilkesi tarafından verilmektedir:

$$\int_V \mathbf{T} : \delta(\mathbf{u}\nabla) dV = \int_A \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} dA \quad (1)$$

Burada  $\mathbf{T}$ , Cauchy-gerilme tensörü,  $\mathbf{u}$ , yerdeğiştirme vektörü, ":" skalar diyadik çarpım<sup>2</sup>, "." vektöriyel çarpım<sup>2</sup> ve  $\delta$  hayali değişimdir. Denklem (1)'de kütle kuvvetleri ihmal edilmiştir. Ayrıca,  $A_u$  yüzeyi için  $\delta \mathbf{u} = 0$  sağlanmaktadır.

Cismin  $t + \Delta t$  zamanındaki konum ve şekli hakkında bilgi edinebilmek için denklem (1) ile verilen bağıntının zamana göre değişimi bulunmalıdır. Bu amaç içinde, denklem (2)'nin  $t^0$  zamanına yani zamanla değişmeyen sabit bir konuma aktarılması gerekiyor. Gerekli kinematik bağlantılarla

$$\int_{V^0} \mathbf{S} : \delta \mathbf{F}^T dV^0 = \int_{A^0} \mathbf{t}^0 \cdot \delta \mathbf{x} dA^0 \quad (2)$$

elde edilir. Burada,  $\mathbf{S}$ , 1. Piola-Kirchhoff gerilme tensörü,  $\mathbf{F}$ , deformasyon gradyanı ve  $\mathbf{x}$ , cismin bir noktasının konum vektörüdür. Bu denklemin zaman-değişim şeklinden Hill'in [2] denklemi elde edilebilir.

Şekil-değişim-işi eşdeğeri bir gerilme ve şekil tensörü çifti kullanılarak denklem (2)'den

$$\int_{V^0} \mathbf{H} : \delta \mathbf{E} dV^0 = \int_{A^0} \mathbf{t}^0 \cdot \delta \mathbf{x} dA^0 \quad (3)$$

bulunabilir. Yukarıda,  $\mathbf{H}$ , 2. Piola-Kirchhoff gerilme tensörü ve  $\mathbf{E}$ , Green-Lagrange şekil değiştirme tensörüdür. Bu denklem geometrik doğrusal olmayan elastik yaklaşımlarının temelini teşkil eder (bkz. örneğin [3]). Malzeme dünyasında zamana göre türev alınırsa

$$\int_{V^0} (\dot{\mathbf{H}} : \delta \mathbf{E} + \mathbf{H} : \delta \dot{\mathbf{E}}) dV^0 = \int_{A^0} \dot{\mathbf{t}}^0 \cdot \delta \mathbf{x} dA^0 \quad (4)$$

bağıntısı yazılabilir. Parantez içindeki ikinci terim, " $\mathbf{H} : \mathbf{E}$ "'nın zamana göre değişiminin konvektif kısmıdır. Kinematik bağlantılarla

$$\dot{\mathbf{H}} = \mathbf{J} [\mathbf{F}^{-1} \cdot \{\mathbf{T}(\mathbf{I}:\mathbf{L}) + \dot{\mathbf{T}} - \mathbf{D} \cdot \mathbf{T} - \mathbf{T} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{T} \cdot \mathbf{W} - \mathbf{W} \cdot \mathbf{T}\} \cdot (\mathbf{F})^T] \quad (5)$$

olduğu kolayca gösterilebilir. Burada,  $\mathbf{J}$ , Jacobi-determinantı,  $\mathbf{I}$ , birim tensörü,  $\mathbf{L}$ , hız gradyanı tensörü,  $\mathbf{D}$ , şekil değiştirme hızı tensörü ve  $\mathbf{W}$  dönme hızı tensörüdür. Denklem (5)'de " $\mathbf{T} \cdot \mathbf{W} - \mathbf{W} \cdot \mathbf{T}$ " terimi rijit cisim dönüşlerini ve " $\mathbf{T}(\mathbf{I}:\mathbf{L}) - \mathbf{D} \cdot \mathbf{T} - \mathbf{T} \cdot \mathbf{D}$ "

<sup>2</sup> Yani:  $\mathbf{T} : \mathbf{A} = T_{ij} A_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3$   
 $\mathbf{T} \cdot \mathbf{B} = T_{im} B_{mj} \quad i, j, m = 1, 2, 3$   
 $\mathbf{t} \cdot \mathbf{b} = t_i b_i \quad i = 1, 2, 3$

terimi başka bir konvektif ögeyi temsil etmektedirler. Büyük parantez içinde bulunan terim ise Cauchy gerilme tensörünün Truesdell zaman değişimini,  $\dot{T}$ , simgelemektedir. Demek ki

$$\hat{T} = \dot{T} + T(I:L) + T.W - W.T - D.T - T.D \quad (6)$$

Denklem (5), (6) ve

$$2\delta\dot{E} = \delta F^I . L . F + F^I . L . \delta F \quad (7)$$

bağıntısı yardımıyla ve hayali bir zamana bölerek, denklem (4)'den

$$\int_{V^0} J[\hat{T}:\delta L + T:(\delta L^I . L)]dV^0 = \int_{A^0} \dot{t}^0 . \delta v dA^0 \quad (8)$$

elde edilir ( $v$ -vektörü cismin herhangi bir noktasının hızıdır). Bu denklem hayali hızlar ilkesinin zamana göre olan türevinin eksiksiz ve doğru olan şeklidir; hiç bir konvektif veya dönel terim ihmal edilmemiştir.

Denklem (8) SEY kapsamında ayrıştırıldığında, simetrik olmayan katılık matrisleri oluşmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için yenilemeli Lagrange yaklaşımı, yani cismin  $t^0$  ve  $t$  zamanlarındaki konumlarının bir an için çakıştırılması, kullanılabilir. Bu durumda

$$x^0 = x, \quad J = 1, \quad A^0 = A, \quad V^0 = V, \quad t^0 = t \quad \text{ancak} \quad t^0 \neq \dot{t} \quad (9)$$

olur ve denklem (8)

$$\int_V [\dot{G}:\delta D - 2(D.T):\delta D + T:(\delta L . L)]dV = \int_A \dot{t}^0 . \delta v dA \quad (10)$$

halini alır. Burada,  $\dot{G}^*$ , Kirchhoff gerilme tensörünün Jaumann zaman değişimini tanımlamaktadır ve Cauchy gerilme tensörünün Jaumann zaman değişimi ( $\dot{T}^*$ ) ile şöyle ifade edilebilir:

$$\dot{G}^* = \dot{J}\dot{T} + J\dot{T} = \dot{G} - W.G + G.W \quad (11)$$

Denklem (10) McMeeking ve Rice [4] tarafından da, Hill'in [2] denkleminden hareket ederek, verilmiştir.

Sonuç olarak, bilinen sınır şartları ve

$$\mathbb{L} \rightarrow \dot{G}^* = \mathbb{L}^{-1} : D \quad (12)$$

şeklinde uygun bir malzeme kanunu ile denklem (10)'dan aranan hız dağılımı  $v$  çözümlenir,  $\Delta t$  zaman dilimi içinde integre edildikten sonra, cismin  $t + \Delta t$  zamanındaki konumu ve şekli kolayca bulunabilir. Denklem (12)'deki dördüncü derece tensörü,  $\mathbb{L}^{-1}$ , malzeme tensörüdür ve aşağıdaki bölümde tanıtılacaktır.

Bu çalışmada kullanılan, büyük şekil değiştirme-

leri için geçerli olan, değişim ilkesi (denklem (10)) ile yaygın olup, ancak çok küçük şekil değiştirmeleri için geçerli olan değişim ilkesinin karşılaştırılması açık bir şekilde [5]'de verilmiştir.

### Malzeme Kanunu

Bu çalışmada Prandtl-Reuss malzeme kanununun genelleştirilmiş bir şekli kullanılmıştır. Prandtl-Reuss kanunları malzemenin saf elastik tepkisini tanımlayan Hooke kanunu ile malzemenin saf plastik tepkisini tanımlayan Lévy-Mises kanunlarının doğrusal bileşkesidir. Bu bileşimin temeli

$$D = D^E + D^P \quad (13)$$

bağıntısına dayanmaktadır. Burada  $D^E$ , toplam şekil değiştirme hızının elastik bölümü,  $D^P$ , ise plastik bölümüdür. Önemle belirtilmesi gereken bir husus, denklem (13) ile verilen bağıntının ancak yaklaşık olarak sağlandığıdır. Lubarda [6] tarafından gösterildiği gibi, denklem (13) ancak ve ancak

$$D^E \ll 1 \quad \text{ve} \quad W^E \ll 1 \quad (14)$$

sağlandığında geçerli olmaktadır. Metal şekillendirme ile yapılan üretimde kullanılan metal türündeki malzemeler denklem (14)'ü oldukça iyi sağladığından, denklem (13)'e dayalı bir malzeme kanununun kullanılmasındaki sakıncalar ortadan kalkmaktadır.

Klasik Prandtl-Reuss denklemlerinde  $D^E$  Hooke kanununun ile verilmiştir:

$$D^E = \dot{T}' / (2G) + (I:\dot{T}') / (9K) \quad (15)$$

Burada,  $T'$ , Cauchy gerilme tensörünün zamana göre olan değişiminin deviator bileşeni,  $G$ , kayma modülü ve  $K$  ise bulk modülüdür.

Denklem (13)'teki plastik birleşen  $D^P$  ise klasik Lévy-Mises denklemleri ile bulunur:

$$D^P = \frac{3}{2} \beta \frac{\dot{k}_f}{k_f (dk_f/d\phi)} T' \quad (16)$$

ile

$$\beta = \begin{cases} 0 & \bar{\sigma}(T) = k_f(\phi) \quad \text{ve} \quad \dot{\sigma}(T) < 0 \quad \text{için} \\ & \text{veya, } \bar{\sigma}(T) < k_f(\phi) \quad \text{için} \\ 1 & \bar{\sigma}(T) = k_f(\phi) \quad \text{ve} \quad \dot{\sigma}(T) \geq 0 \quad \text{için} \end{cases} \quad (17)$$

Denklem (16) ve (17)'de  $k_f$ , basit çekme deneyindeki akma gerilmesi,  $\phi$ , basit çekme deneyindeki logaritmik şekil değişimi ve  $\bar{\sigma}(T)$ , etken von Mises gerilmesidir. Son iki bağıntıda plastik şekil değişimi sırasında hacim sabitliği, izotrop malzeme ve izotrop pekleşme varsayılmıştır. Denklem (17) von Mises plastik akma kriterini tanımlamaktadır.

Denklem (15) ve (16) denklem (13)'e konup, çıkan bağıntının tersimi alınır (bu tersim ilk defa Yamada et al. [7] tarafından yapılmıştır)

$$\dot{T} = 2G \left[ I + \frac{\nu}{1-2\nu} II - \beta \frac{T' T'}{\frac{2}{3} k_f^2 \left( 1 + \frac{1}{3G} k_f'(\varphi) \right)} \right] : D \quad (18)$$

elde edilir ( $\nu$  Poisson katsayısıdır)<sup>3</sup>. Bu klasik malzeme kanunu olup, çok küçük şekil değiştirmeleri için geçerlidir. Ancak genel bir şekil değişim büyüklüğü için bu kanun - objektiflik aksiyomu (bkz. Eringen [8]) dikkate alınarak-

$$\dot{T}^* = 2G \left[ I + \frac{\nu}{1-2\nu} II - \beta \frac{T' T'}{\frac{2}{3} k_f^2 \left( 1 + \frac{1}{3G} k_f'(\varphi) \right)} \right] : D \quad (19)$$

şeklinde genelleştirilebilir. Burada  $T^*$  denklem (11)'de kullanılan Cauchy gerilme tensörünün Jaumann zaman değişimidir. Plastik şekil değiştirerek yapılan üretim işlemlerindeki malzemelerin elastik şekil değişimlerinin küçüklüğü göz önünde bulundurularak, yani

$$J \approx 1 \quad \text{ve} \quad \dot{J} \ll 1, \quad (20)$$

denklem (11)'den denklem (19)'daki  $T^*$ 'nin iyi bir hassasiyetle  $G^*$  ile değiştirilebileceği anlaşılır. Böylece denklem (12)'de aranan malzeme tensörü

$$L^{-1} = 2G \left[ I + \frac{\nu}{1-2\nu} II - \beta \frac{T' T'}{\frac{2}{3} k_f^2 \left( 1 + \frac{1}{3G} k_f'(\varphi) \right)} \right] \quad (21)$$

olarak bulunur.

Sonuç olarak, problemin çözümü için gerekli tüm bağıntılar denklem (10), (12), (17) ve (21) ile verilmişlerdir. Ancak, bu denklem kümesinin kapalı analitik çözümü yoktur. Problemin sayısal yöntemler ile çözümü aşağıdaki bölümde incelenecektir.

### Sayısal Çözüm

Bölgesel Ritz-yöntemi yardımıyla denklem (10) bilinen yaklaşımlarla (bkz.[9,10]) ayrıştırılıp

$$[K_T] \{a\} = \{f^0\} \quad (22)$$

şeklindeki sonlu eleman yöntemi denklemleri bulunur. Burada,  $[K_T]$ , sistemin katılık matrisi,  $\{a\}$  vektörü, elemanların düğüm noktalarında aranan malzeme hızları ve  $\{f^0\}$ -vektörü de bu noktalardaki kuvvet hızlarını temsil etmektedir.  $[K_T]$  matrisinin açılımı [11]'de bulunabilir. Denklem (22) düğüm

<sup>3</sup>  $k_f'(\varphi)$  akma gerilmesinin ( $k_f$ 'in)  $\varphi$ 'e göre türevidir; Yani  $k_f'(\varphi) = dk_f/d\varphi$ 'dir.

noktalarındaki malzeme hızları cinsinden doğrusaldır. Ancak denklem (22) bir  $\Delta t$  zaman dilimi içinde uygulandığında, yani

$$[K_T^*] \{\Delta b\} = \{\Delta f^0\} \quad (23)$$

elde edildiğinde, ortaya yerdeğiştirme farkları ( $\Delta b$ ) cinsinden son derece doğrusal olmayan bir denklem kümesi çıkmaktadır, zira

$$[K_T^*] \{\Delta b\} = \int_{\Delta t} [K_T] \{a\} dt \quad (24)$$

olup, karmaşık bir şekilde  $\{\Delta b\}$ 'e bağlıdır. Söz konusu bağımlılığın iki kaynağı vardır: geometrik değişimler ve malzeme tepkisi. Bu iki kaynaktan doğan doğrusal olmayan bağımlılıklar ayrı sayısal yöntemlerle çözülmüştür:

**Malzeme tepkisinden doğan doğrusal olmayan kuvvet - yerdeğiştirme bağıntısının çözümü:** Bu amaç için orta-nokta-katılık-matrisi yöntemi uygulanmıştır (Şekil 2). Bu yöntem dögüsel bir karaktere sahip olup, ilk yenileme döngüsü için denklem (23)'de  $[K_T^*]$  yerine  $[K_T]$  kullanılarak, verilen bir  $\{\Delta f^0\}$ -kuvvet vektörü için bir yerdeğiştirme farkları vektörü  $\{\Delta b_1\}$  bulunur.  $\{\Delta b_1\}$  yardımıyla da gerilme farkları ( $\Delta T$  ve  $\Delta k_f$ ) elde edilir. Bu değerlerle

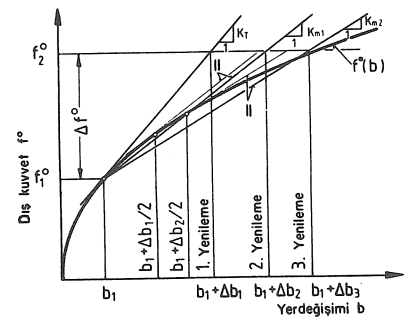
$$\{T\} = \{T_1\} + 0.5\{\Delta T\}$$

$$\{k_f\} = \{k_{f1}\} + 0.5\{\Delta k_{f1}\} \quad (25)$$

bulunup, katılık matrisi yeniden hesaplanarak  $[K_m]$  elde edilir.

$$[K_m] \{\Delta b\} = \{\Delta f^0\} \quad (26)$$

denklem kümesinin yerdeğiştirme farkları için yeniden çözülmesiyle de yeni bir  $\{\Delta b_2\}$  vektörü bulunur. Yeni yerdeğiştirme farklarından gerilme farkları, denklem (25) ile de yeni bir orta-nokta-



Şekil 2 Orta-nokta-katılık matrisi yöntemi

katılık-matrisi hesaplanır. Yakınsaklık kriteri olarak bu yenileme döngülerin adeti kullanılmıştır. Geniş bir araştırmamın [12] sonunda, döngü limiti 3-4 olarak tespit edilmiştir.

$\Delta T$  ve  $\Delta k_f$  gerilme farklarının hesaplanmasında, bir zaman dilimi içinde elastik tepkiden elastik-plastik tepkiye geçiş yapan elemanlar ile, elastik-plastik olarak akan elemanlardaki gerilme tensörünün - pekleşmeyi de göz önüne alarak - zaman dilimi sonunda malzemenin akma yüzeyi üzerinde bulunması zorunluluğuna özel bir itinaya gösterilmesi gerekmektedir. Bu önemli iki konunun incelenmesi [11]'de verilmiştir.

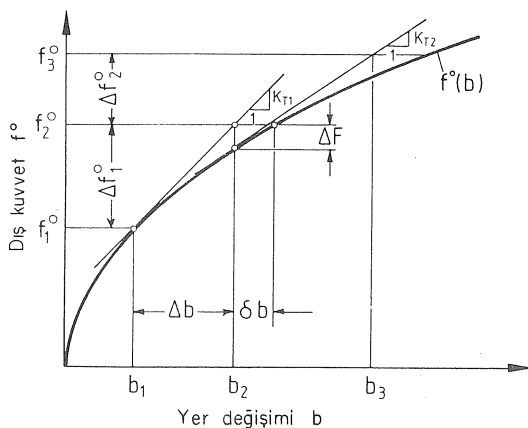
**Geometri değişiminden doğan doğrusal olmayan kuvvet-yerdeğiştirme bağıntısının çözümü:** Elastik-plastik şekil değişiminin sayısal çözümünde iki nedenden ötürü küçük zaman dilimlerinin kullanılması zorunluluğu vardır:

1. Malzeme kanunu zaman değişimi şeklindedir ve dolayısıyla malzemenin zamana göre teğetsel tepkisini tanımlar.

2. Metal şekillendirme işlemlerinde sınır koşulları - örneğin kalıpların yüzeyleri ile belirlenen koşullar - zamana son derece kuvvetli bir bağımlılık göstermektedirler. Bu süratle değişen sınır koşullarının doğru olarak çözüme aktarılması için küçük zaman dilimlerinin kullanılması kaçınılmazdır.

Yukarıdaki nedenlerle zaten verilmiş olan küçük zaman dilimlerinin kullanılması zorunluluğundan, geometri değişiminden doğan doğrusal olmayan kuvvet-yerdeğiştirme bağıntısının çözümünde faydalanılabilir. Çözüm yöntemi Şekil 3'de verilmiştir. Söz konusu olan yöntem geri-dönüşümlü Euler yöntemidir [3]. Bu yöntemin diğer bir adıda "kendini düzelten" yöntemdir [13]. Denklem (26)'da verilen  $\{\Delta f_0^o\}$  dış kuvvetleri için bulunan  $\{\Delta b\}$  yerdeğiştirme farkları vektörü ile cismin yeni konumu  $\{b_2\} = \{b_1\} + \{\Delta b\}$  diye hesaplanır. Cismin bu yeni konumu için

$$\{\Delta F\} = \{f^o\} - \int_V [B]^T \{T\} dV \quad (27)$$



Şekil 3 Geri-dönüşümlü Euler yöntemi

şeklinde denge-dışı kuvvet vektörü elde edilir. Burada [B] SEY çerçevesinde kullanılan iç değer biçim fonksiyonları matrisidir. Bu şekilde elde edilen  $\{\Delta F\}$  yardımıyla bundan sonraki zaman dilimi için

$$[K_m] \{\Delta b\} = \{\Delta f_0^o\} + \{\Delta F\} \quad (28)$$

yazılır. Zaman dilimlerinin küçüklüğü nedeniyle Şekil 3'de gösterilen  $\delta b$  hatası son derece küçük kalmaktadır. [14]'de de anlaşıldığı gibi, bu yöntem yaygın olarak kullanılan Newton-Raphson tipindeki çözüm yöntemlerinden söz konusu problemlerde 3-4 misli daha hızlı çalışmaktadır.

**Sonlu eleman yöntemi yazılımı:** Yukarıda verilen tüm mekanik ve sayısal temeller EPDAN (Elastik-Plastik Deformasyon Analizi) adlı yazılımda gerçekleştirilmiştir. EPDAN program sistemi grafik modülleri ile birlikte 10.000'inin üstünde işlem satırından oluşmakta ve FORTRAN 77 dilinde yazılmıştır. EPDAN'ın değerlendirilmesi aşağıdaki bölümde verilecektir.

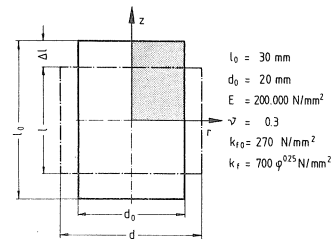
#### EPDAN PROGRAMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

EPDAN programının değerlendirilmesi çeşitli kuramsal ve deneysel yöntemlerle yapılan karşılaştırmalar ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde önce iki analitik ve bir sayısal karşılaştırmadan sonra deneysel bir karşılaştırma verilecektir.

#### Sürtünmesiz Yığıma İşleminde Analitik Çözüm ile Karşılaştırma

Eksenel simetriğe sahip sürtünmesiz yığıma işlemi ideal bir işlem olup, pratikte ancak Rastegaev tipi numunelerin [15] veya Teflon-floye [16] kullanılarak yaklaşık da olsa elde edilebilir. Sürtünme ve malzeme kaymalarının yokluğu kapalı analitik çözümlerin bulunabildiği homojen plastik şekil değiştirmeleri için temel şarttır. Bu nedenle sürtünmesiz yığıma işleminin analitik çözümü vardır ve EPDAN'ın ilk değerlendirmesi için iyi bir olanak sağlanmaktadır.

Şekil 4'de verilmiş olan problem için gerilme



Şekil 4 Bir silindirin sürtünmesiz yığılma işleminin verileri

<sup>4</sup> Şekil 4'de verilen verilerde  $k_{f0}$  malzemenin pekleşmeden önceki akma gerilmesidir.

tansörü T son andaki parça boyu l cinsinden analitik olarak

$$T_z = -k_f = -700\phi^{0.25} \text{ N/mm}^2; T_t = T_r = T_{rz} = 0 \quad (29)$$

ve

$$\phi = \ln(l_0/e) \quad (30)$$

olarak bulunur. Değişen parça boyu cinsinden parçanın yük altındaki şekli, o andaki hacmi, V, ile tam olarak tanımlanabilir:

$$V/V_0 = 1 + T_z/(3K) \quad (31)$$

Bu denklemde  $V_0$  parçanın başlangıç hacmidir. Parçanın yığılmadan sonraki  $l = 18$  mm boyu için, yani bir etken şekil değişimi  $\phi = 0.51$  için, şu değerler elde edilir:

$$T_z = -591.8 \text{ N/mm}^2; V/V_0 = \% 99.882 \quad (32)$$

Denklem (32)'de gözükten hacim kaybı, elastik şekil değiştirme payının sonucudur.

Aynı problem EPDAN ile de incelenmiştir. Bu amaçla 150 isoparametrik, dört düğüm noktalı yüzük elemanı kullanılmıştır. İşlemdeki simetri nedeniyle yalnız Şekil 4'de karartılmış olan kısım elemanlar ile donatılmıştır. Hesaplama adımı olarak  $\Delta z = -0.02$  mm, yani  $\Delta\phi = 0.0017$  kullanılmış ve toplam 300 zaman adımı atılmıştır. Elde edilen sonuçlar şöyledir:

$$T_z = -591.5 \text{ N/mm}^2; |T_r| \approx |T_t| \approx |T_{rz}| < 10^{-7};$$

$$V/V_0 = \% 99.816 \quad (33)$$

Denklem (32) ile (33) karşılaştırıldığında mükemmel bir uyum görülmektedir. Buna rağmen iki yöntemin verdiği sonuçlar arasındaki küçük farklar bile açıklanabilir:

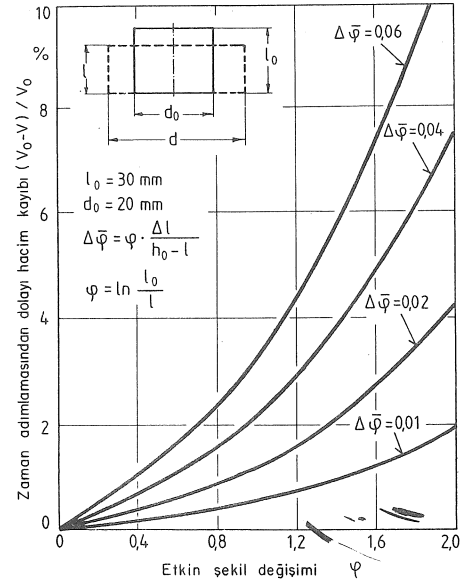
EPDAN ile yapılan hesapta çıkan % 0.066 hacim "kayıbı" zamansal adımlamanın etkisi ile açıklanabilir. Sürtünmesiz yığılma işlemi için  $(n + 1)$  zaman adımıdaki hacim

$$V_{n+1}/V_0 = [r^2(l_n - 0.75\Delta l_n^2/l_n - 0.25\Delta l_n^3/l_n^2) / (r_0^2 l_0)] \quad (34)$$

ve

$$r_n = r_{n+1} + 0.5r_{n-1} \Delta l/l_{n-1}; l_n = l_{n-1} - \Delta l \quad (35)$$

olduğu kolayca gösterilebilir [5]. Bu bağıntı kullanılan yaklaşımdan tamamen bağımsızdır ve yalnız zaman adımlamasından doğan yapay hacim kaybını



Şekil 5 Metal şekillendirme işlemlerinin sayısal çözümlemesinde zaman adımlamasından dolayı ortaya çıkan hacim kaybı hatasının etken şekil değiştirme değerleri cinsinden dökümü

vermektedir. Bu hacim kaybı değişik adım büyüklükleri için Şekil 5'de verilmiştir ve etken şekil değişimi parametre olarak kullanıldığından, diğer şekillendirme işlemlerinin sayısal benzetimindeki hacim kaybı hatasının bulunmasında da kullanılabilir.

Söz konusu örneğe dövrülürse,  $n = 299$  ile (34) ve (35)'den

$$V_{300}/V_0 = \% 99.933 \quad (36)$$

bulunur. Bu değer denklem (32) ile çarpılırsa

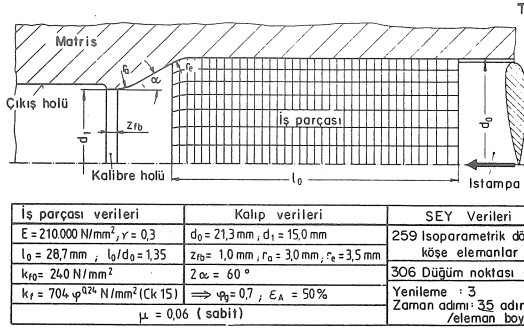
$$V^*/V_0 = \% 99.815 \quad (37)$$

elde edilir ve denklem (33) ile karşılaştırıldığında pratik olarak eşit olduğu görülür.  $T_z$  gerilmelerindeki küçük fark da aynı şekilde açıklanabilir.

#### Ekstrüzyonda Basitleştirilmiş Plastisite Kuramı ile Karşılaştırma

Basitleştirilmiş plastisite kuramı [17] kolay kullanımı nedeniyle yıllarca endüstride başarıyla uygulanmıştır. Bu kuram ile genellikle yalnız şekil verme kuvvetlerinin hesaplanabilmesi nedeniyle, burada ekstrüzyon işlemindeki baskı kuvvetleri karşılaştırılacaktır.

Şekil 6'da EPDAN ile yapılan benzetimlerin örnek verileri gösterilmektedir. Ekstrüzyon kuvvetinin basitleştirilmiş plastisite kuramı çerçevesinde hesaplanması Siebel'in [18] denklemi ile yapılmıştır:

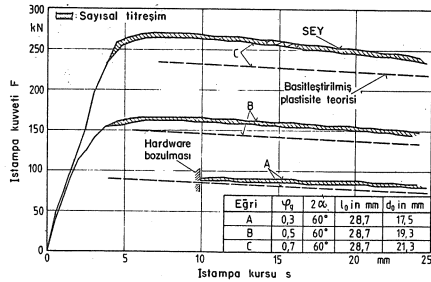


Şekil 6 EPDAN ile yapılan ekstrüzyon işleminin sayısal benzetiminde kullanılan örnek veriler ve eleman ağı

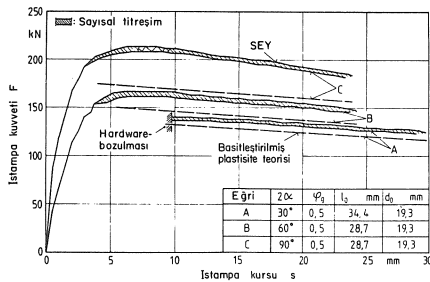
$$F = A_0 \cdot k_{fm} \cdot \varphi_g + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \cdot k_{fd} \cdot A_0 + \pi \cdot d_0 \cdot l \cdot k_{f0} \cdot \mu + \frac{2k_{fm} \cdot \varphi_g \cdot \mu \cdot A_0}{\sin 2\alpha} \quad (38)$$

Burada  $F$ , istampa kuvveti,  $A_0$ , metal kütüğün kesit alanı,  $l$ , kütük uzunluğu,  $\varphi_g (= 2 \ln(d_0/d_1))$ , geometrik şekil değişimi,  $k_{df} (= k_{f0} + k_f)/2$ , akma gerilmelerinin aritmetik ortalaması ve  $k_{fm} (= (\int_{\varphi} k_f d\varphi)/\varphi)$ 'de integral ortalamasıdır.

Şekil 7 ve 8'de elde edilen sonuçlar geometrik şekil değişimine ( $\varphi_g$ ) ve matris dirsek açısına ( $2\alpha$ ) bağlı olarak verilmiştir.



Şekil 7 Ekstrüzyon işleminin istampa kuvveti-kursu eğrileri: SEY ile basitleştirilmiş plastisite kuramının karşılaştırılması (sabit kalıp dirsek açısı)



Şekil 8 Ekstrüzyon işleminin istampa kuvveti-kursu eğrileri: SEY ile basitleştirilmiş plastisite kuramının karşılaştırılması (sabit geometrik şekil değişimi)

İki şekilde de dikkati çeken dört nokta vardır:

1. artan geometrik şekil değişimi veya artan kalıp dirsek açısı değerleri için, iki yöntemle hesaplanmış kuvvetler arasındaki farkın artması,
2. iki yöntemle hesaplanmış kuvvet-yol-doğrularının değişik eğimlere sahip olması,
3. Pratikte görülen işlemin başlangıcındaki kuvvet zirvesinin bulunmaması,
4. ve nihayet, EPDAN ile hesaplanmış kuvvet eğrisindeki titreşimler.

İlk iki hususun nedenleri aynıdır ve Siebel'in denklemindeki (38) bir basitleştirmeden kaynaklanmaktadır. Denklem incelendiğinde, kalıp içi sürtünmeyi göz önüne alan " $\pi \cdot d_0 \cdot L \cdot k_{f0} \cdot \mu$ " teriminde parçanın kalıba uyguladığı basıncın  $k_{f0}$ 'e eşitlendiği görülmektedir. Yani, geometrik şekil değişimi veya dirsek açısı ne olursa olsun, parçanın kalıba uyguladığı basıncın  $k_f$  olduğu varsayılmaktadır. Oysa ki bu yanlıştır. EPDAN ile de yapılan hesaplar iç basıncın şekildedeki A eğrileri için  $k_{f0}$ 'dan küçük olduğunu, B eğrileri için  $k_{f0}$ 'a yakın olduğunu ve C eğrileri için de  $k_{f0}$ 'dan büyük olduğunu göstermiştir. Siebel'in denklemindeki  $k_{f0}$  gerçek iç basınç değerleri ile değiştirildiğinde, iki yöntem ile hesaplanan kuvvetler arasındaki fark % 10'un altına inmektedir. Ayrıca basit bir hesap ile de gösterilebileceği gibi, kuvvet-yol-doğrularının eğimi doğrudan doğruya iç basınca bağlı olduğundan, şekillerde görülen eğim farkı da aynı neden ile açıklanabilir.

Şekil 7 ve 8'de yapılan üçüncü gözlem, kuvvet zirvesinin yokluğu, ise EPDAN ile yapılan benzetimde sabit bir sürtünme katsayısının kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi, kuvvet zirvesi metal bloğun kalıbın iç yüzeyi boyunca kaymaya başladığı anda, sürtünme katsayısının düşmesinden meydana gelmektedir. Bu doğal olayın EPDAN ile sayısal benzetimi mümkün olmasına rağmen, basitleştirilmiş plastisite kuramında da kuvvet zirvesinin hesaplanamamasından dolayı, bu örnek çerçevesinde vazgeçilmiştir. Ancak boru ekstrüzyonu işleminin benzetiminde [19], özellikle malafa ve iş parçasının etkileşiminin incelenmesi açısından, kaymanın başlamasıyla sürtünme katsayısının düşüşü göz önüne alınmıştır.

Yapılan son gözlem, SEY ile elde edilen sonuçlarda titreşimlerin varolması, ayrıklaştırma yaklaşımına bağlanabilir. Zira, cismin hacimsel ayrıklaştırılması sınır koşullarında da bir ayrıklaştırmaya neden olmaktadır. Titreşimler incelendiğinde, titreşim periyodunun bir sonlu eleman genişliğine karşı geldiği görülebilir. Dolayısıyla, eleman ağıнын sıklaştırılması ile titreşimler azaltılabilir.

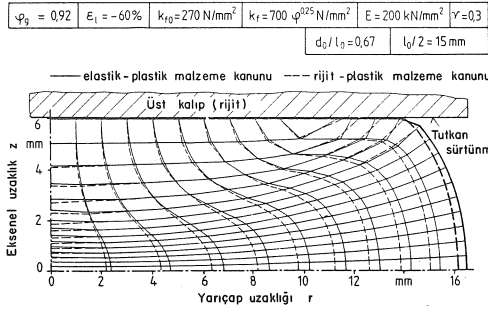
#### Rijit-Plastik Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Karşılaştırma

Roll [20] tarafından rijit plastik malzeme etkisine dayanan bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Roll'un programı bugüne dek başarıyla

metal şekillendirme işlemlerinin çözümlenmesinde kullanılmış ve deneysel gözlemler ile çok iyi uyum sağlamıştır. Rijit-plastik bir malzeme kanununun kullanılması nedeniyle, EPDAN ile karşılaştırmalar ancak akan malzeme bölgelerinde yapılabilmektedir<sup>5</sup>. Karşılaştırmalar üç şekil verme işleminde yapılmıştır:

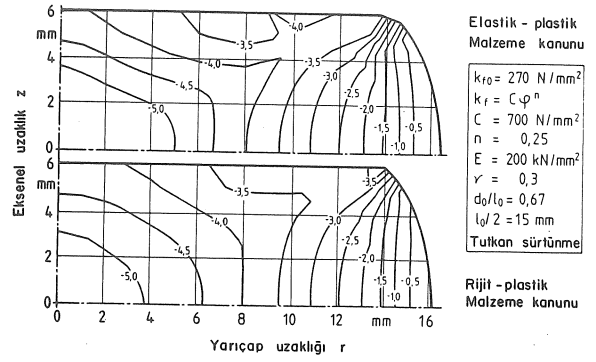
**Eksenel simetriğe sahip yığılma işlemi:** Yığılma takımı ile iş parçası arasındaki sürtünme tutkan olarak alınmıştır. Bu sürtünme tipi tamamıyla kinematik bir sınır koşulu olduğundan, sağlıklı bir karşılaştırma için son derece uygundur. İncelenen örnekte iş parçasının boyu % 60 oranında yığılma suretiyle kısaltılmış ve 30 mm'den 12 mm'ye indirilmiştir. Malzeme Alman Ck15 çeliğidir ve bu bildiriye tüm örneklerde kullanılan iş parçası malzemesine karşı gelmektedir. Sayısal benzetim için her iki programda da 150 izoparametrik dört düğüm noktalı yüzük elemanlar kullanılmıştır. Böylece EPDAN ile yapılan hesaplarda 352 serbestlik derecesi, rijit-plastik SEY ile yapılan hesaplarda da 502 serbestlik derecesi (352 deplasman + 150 hidrostatik basınç) vardı.

Şekil 9 % 60'lık bir boy kısaltmasından sonra malzemeyle birlikte şekil değiştirmiş sonlu eleman ağlarını göstermektedir. İki SEY ile hesaplanmış yeni eleman şekilleri oldukça iyi bir uyum göstermektedirler. İki çözüm arasındaki hacimsel fark % 4 olup Şekil 5 ile açıklanabilir: rijit-plastik yöntem ile yapılan hesaplarda kullanılan adım sayısı EPDAN'da kullanılan adım sayısının beşte biri olduğundan, EPDAN'ın çözümünde ortaya çıkan hacim kaybı hatası daha düşüktür.



Şekil 9 % 60'lık bir yığılma işleminden sonra şekil değiştirmiş sonlu eleman ağları: rijit-plastik ve elastik-plastik SEY benzetimlerinin karşılaştırılması

<sup>5</sup> Şekil değişimindeki plastik payın elastik paydan 1000 defaya yakın daha büyük olması nedeniyle, rijit-plastik malzeme kanununda elastik şekil değişimleri tamamıyla ihmal edilmektedirler. Böylece yöntemde doğrusal olmayan kinematik bağıntılar görülmeyip, yöntemin hesaplama sürati artmaktadır. Ancak bu kazanç uğruna elastik-plastik kanuna kıyasla şu dezavantajlar göze alınmaktadır: a) Rijit veya elastik malzeme bölgelerinde doğru bir çözüm bulmak mümkün değildir. Bu özellikle sürtünmenin var olduğu durumlarda kritik bir sorun haline gelmektedir. b) Kalıcı gerilmeler ve geri yaylanmaları gibi elastik orjinal olguların sayısal benzetimi mümkün değildir. Bu bildiriye, rijit-plastik veya elastik-plastik malzeme kanunundan hangisinin metal şekillendirme işlemlerinin benzetimi için daha uygun olduğu tartışılmasına girilmeyip, benzetimin amacına en uygun olan kanunun kullanılması gerektiğinin vurgulanması ile yetinilecektir.

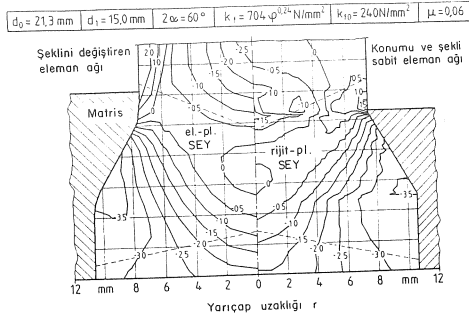


Şekil 10 % 60'lık bir yığılma işleminden sonra iş parçası içindeki görel eksenel gerilmeler  $T_z/k_{f0}$ : rijit-plastik ve elastik-plastik SEY hesaplarının karşılaştırılması

Şekil 10'da aynı yığılma derecesi için cismin içindeki görel eksenel gerilmeler  $T_z/k_{f0}$  verilmiştir. Özellikle sabit-gerilme-eğrilerinin sık olduğu, yani gerilme değişimlerinin yüksek olduğu bölgelerde oldukça iyi bir uyum görülmektedir. İki yöntem arasındaki en büyük fark beklendiği gibi dört köşe elemanın üçgen eleman haline geldiği (bkz. Şekil 9) bölgededir. Bu bölge, iş parçasının yığılma yapılmadan önceki köşesini ( $r = 10 \text{ mm}$ ) kapsamaktadır. Bu şekilde şiddetli şekil değişimi gösteren sonlu elemanların katılık matrisleri Gauss yöntemiyle integre edilirken büyük hatalar vermektedirler. Dolayısıyla, bu çeşit elemanların içindeki ve çevresindeki sonuçlar dikkatle kabullenmelidir.

**Eksenel simetriğe sahip ekstrüzyon işlemi:** Karşılaştırma için iş parçasının kesit alanını % 50 ( $\varphi_g = 0,7$ ) oranında küçültten bir ekstrüzyon işlemi seçilmiştir. Kalıp dirsek açısı  $2\alpha = 60^\circ$  olarak alınmıştır. Problemin sürekli hal karakterinden faydalanarak, rijit-plastik SEY ile konumu kalıba göre sabit bir sonlu eleman ağı kullanılmıştır. Kontrol hacmine giren ve çıkan malzemenin elastik özellikleri önceden belli olmadığından, aynı tip bir eleman ağı EPDAN ile yapılan hesaplarda kullanılmamıştır. Burada yine malzeme ile birlikte şekil değiştiren bir eleman ağı kullanılmış ve ekstrüzyon işleminin, kütüğün kalıba konmasından başlanarak sürekli hal elde edilene dek sayısal benzetimi yapılmıştır.

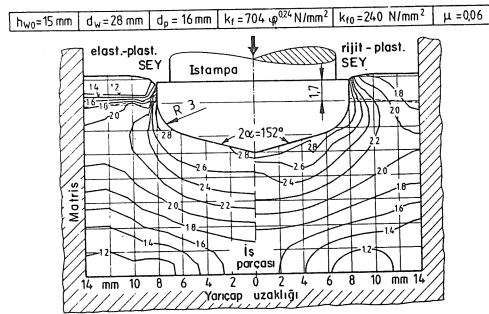
Şekil 11'de şekil veren kalıp çevresinde iş parçasındaki görel eksenel gerilme ( $T_z/k_{f0}$ ) dağılımı verilmektedir. Şekilde ayrıca kesik çizgilerle elastik (veya rijit) ve elastik-plastik olarak tepki gösteren malzeme bölgeleri de ayrılmıştır. Doğal olarak, sağlıklı bir karşılaştırma ancak elastik-plastik olarak akan malzeme bölgelerinde yapılabilir. Bu bölgelerde - özellikle kalıbın dirsek altlarında - iki yöntemin verdiği çözüm oldukça iyi bir uyum göstermektedir. Ancak kalıbın çıkışındaki dirsek köşeleri çevresindeki çözümlerde farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bunların nedeni öncelikle iki çözümün elde edilmesinde kullanılan değişik sınır koşullarına bağlanabilir. Rijit-plastik SEY ile yapılan benzetimde keskin dirsek köşeleri kullanılırken, elastik-plastik



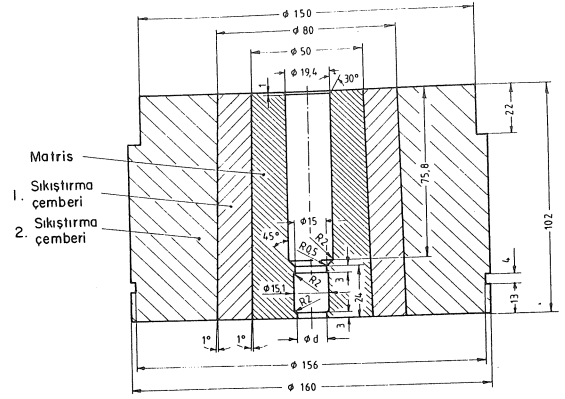
Şekil 11 % 50'lik bir kesit alanı daralmasını sağlayan ekstrüzyon işleminde parça içindeki görelî aksel gerilmeler  $T_z/k_{f0}$

SEY ile yapılan benzetimde bu - elastik-plastik malzemenin hatırlama yeteneğinden dolayı- mümkün olmamıştır. Bu nedenle, EPDAN ile yapılan sayısal benzetimde dirsek köşeleri yuvarlatılmıştır. (3 mm yarıçap ile). Sınır koşullarındaki bu değişiklik kendisini özellikle kayma gerilmeleri dağılımında hissettirmektedir [21].

**Eksenel simetriğe sahip püskürtme işlemi:** Püskürtme işlemi verileri ile işlem sırasında iş-parçası içinde var olan (5 mm'lik bir ıstampa yolu için) görelî etken gerilmeleri ( $\sigma/k_{f0}$ ) Şekil 12'de verilmişlerdir. İncelenen problemde kesit alanı değişimi % 33'dür ve 7.3 mm'lik bir ıstampa yolundan sonra elemanların aşırı derecede büzülmesinden dolayı hesaplamalar durdurulmuştur. EPDAN ile yapılan benzetimde dört köşeli 210 izoparametrik yüzük elemanı kullanılmıştır. Buna karşın rijit-plastik yöntemde 482 yüzük elemanı kullanılmıştır. Şekil 12'de de elastik tepki gösteren malzeme ile elastik-plastik tepki gösteren malzeme kesik birer çizgiyle ayrılmıştır. Elastik bölgeler tüpün oluşmaya başladığı ıstampa ile matris arasında kalan küçük bölümde görülmektedir. Ekstrüzyon örneğinde de olduğu gibi, sağlıklı bir karşılaştırma ancak elastik-plastik olarak akan malzeme bölgesinde yapılabilir. Eleman sayısındaki farklılıklara rağmen, bu bölgelerde oldukça iyi bir uyum göze çarpmaktadır. Elastik bölgelerde ise, rijit-plastik yöntemdeki etken gerilmesinin akma gerilmesine eşit tutulması nedeniyle beklenen farklılıklar görülmektedirler.



Şekil 12 Püskürtme işlemi sırasında iş-parçası içindeki görelî etken gerilmesi ( $\sigma/k_{f0}$ ) dağılımı (ıstampayolu: 5 mm)



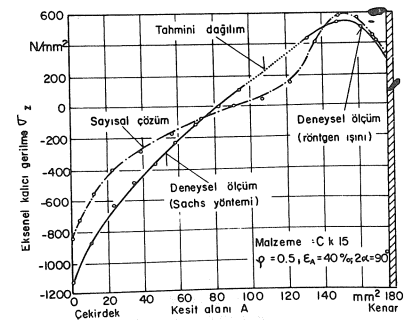
Şekil 13 Deneysel olarak kullanılan bir ekstrüzyon kalıbının teknik resmi (tüm ölçüler mm cinsindedir ve söz konusu örnekte d-çapı 15.1 mm olarak alınmıştır.)

### Deneysel Bulgular ile Karşılaştırma

EPDAN ile yapılan benzetimlerin deneysel bulgular ile karşılaştırılabilmesi için Şekil 13'de teknik resmi verilen kalıp ile bir dizi parça ekstrüzyon ile üretilmiştir. İşlemdeki görelî kesit alanı % 40 oranında daraltılmış ve kalıp dirsek açısı  $2\alpha = 90^\circ$  olarak kullanılmıştır. Böylece parça 19.3 mm çapından 15.0 mm çapına indirgenmiş oluyor. Kullanılan malzeme yine Ck15 çeliğidir ve ilk akma gerilmesi  $250 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Parçalar peşpeşe kalıptan geçirildiği için çıkan parçalar çubuk şeklindedir. Tüm işlemler oda sıcaklığında yapılmış ve yağlama için Bonderlup 234 sabunu kullanılmıştır. Deneysel 3150 kN'lık mekanik bir pres ile yapılmıştır.

Kuram ile deney arasındaki karşılaştırma ekstrüzyon ile üretilmiş çubukların içinde kalan kalıcı gerilmeler cinsinden yapılacağından, bu gerilmelerin ölçümü gerekiyordu. Ekstrüde edilmiş bir çubukta kalıcı gerilmeler işlemin sürekli hal özelliği nedeniyle (parça uçları dışında) aksel bir değişim göstermemektedirler. Bu nedenle parça çekirdeği çevresindeki kalıcı gerilmelerin ölçümü Sachs'ın delme yöntemiyle [22] yapılmıştır. Parça yüzeyindeki ölçümler ise röntgen ışınları yöntemi [23] ile yapılmıştır [24].

Yapılan çok sayıda karşılaştırmalardan Şekil 14'de bir örnek verilmiştir. Şekilde ekstrüzyon ile



Şekil 14 Ekstrüzyon ile üretilmiş bir çubuk içinde aksel kalıcı gerilme dağılımı: ölçüm ile hesapların karşılaştırılması



üretmiş çubuğun orta bölümü için, kesit alanı (A) boyunca aksel kalıcı gerilmeler çizilmiştir. Çubuğun çekirdeğinden (A = 0) 100 mm<sup>2</sup>'lik kesit alanına kadar olan ölçümler (kesiksiz çizgi) Sachs yöntemiyle elde edilmiştir. 130 mm<sup>2</sup> ile yüzey (A = 177 mm<sup>2</sup>) arasındaki ölçümler röntgen ışınları ile yapılmıştır. Ölçüm yapılamayan 100 mm<sup>2</sup> - 130 mm<sup>2</sup> arasındaki gerilme dağılımı tahmin edilmiştir. EPDAN ile elde edilen sonuçlar noktalı kesik bir çizgi ile aynı şekilde verilmiştir. Deneysel ölçümler ile kuramsal hesaplar arasındaki uyum oldukça tatminkardır. Özellikle ölçümlerin çok hassas olarak yapılabildiği yüzeye yakın bölgedeki uyum son derece tatminkardır. Parçanın çekirdek kısmında hesap ve ölçümlerin arasındaki farkın nispeten büyük olması, uygulanan Sachs-ölçüm-yöntemindeki hata kaynaklarının çokluğundan meydana gelmektedir. Günün teknolojisi ile bu hataların ortadan kaldırılması mümkün değildir.

EPDAN ile elde edilen kalıcı gerilme dağılımının statik bir kontrolünün de yapılması mümkündür. Zira kesit boyunca toplam kuvvetin sıfırlanması için, sürekli hal neticesinde

$$\int_A \sigma_z dA = 0 \quad (39)$$

olması yeterlidir. Şekil 14'de verilen  $\sigma_z$ -dağılımı için, baskı kuvveti -26.101 N, çekme kuvveti de 26.122 N olarak bulunabilir. Dolayısıyla statik denge hatası % 0.08'in altında kalmakta ve hesapların hassasiyetine iyi bir delil teşkil etmektedir.

## SONUÇ

Metal şekillendirme işlemlerinin sayısal benzetimini yapan bir sonlu elemanlar yöntemi tanıtmıştır. EPDAN adlı, bu amaçla yazılan bilgisayar programının değerlendirilmesi için bir dizi uygulamalar verilmiştir. Bu uygulamalardaki karşılaştırmalar gerek başka kuramsal çözümler ile, gerekse de deneysel ölçümler ile yapılmıştır.

Karşılaştırmaların ışığı altında EPDAN adlı SEY-programının gerçeklere uygun olarak şekillendirme işlemlerinin benzetimini yapabildiği kanıtlanmıştır. Bildirideki sayısal çözümler ile ilgili önemli bir konu, verilen sonuçların yalnızca birer örnek oluşudur. Yapılan bir sayısal benzetim sonunda, fiziksel işlem hakkındaki tüm bilgiler elde edilebilmektedir. Yani: şekil verme zamanı boyunca, herhangi bir an için, iş-parçasının geometrisi, var olan gerilme ve şekil değiştirme tensörleri, kalıp üzerine etki eden basınçlar ve tabii ki istampa kuvvetleri. Bunlarında ötesinde EPDAN'a eklenebilir program modülleri ile de, iş-parçasının işlem sırasındaki sıcaklık artımı, malzeme içindeki metalurjik değişimler ve hatta muhtemel çatlaklar dahi, işlem gerçekleşmeden bilgisayar ile hesaplanabilirler. Dolayısıyla SEY, metal şekillendirme endüstrisi için, teknoloji üretiminde önemli ve güçlü bir araç olarak kabul edilmelidir.

## TEŞEKKÜR

Yazar bu araştırmaya cömert mali desteğini esirgemeyen Volkswagenwerk Vakfına ("Stiftung Volkswagenwerk"), Hannover, F.Almanya teşekkürü bir borç bilir.

## FINITE ELEMENT SIMULATION OF METAL FORMING PROCESSES

The increasing importance of metal forming as a manufacturing process demands powerful theoretical tools of analysis. In this paper, firstly, the fundamentals of a finite element approach for the numerical simulation of metal forming processes are presented. The formulation is based on the rate form of the principle of virtual velocities by including all kinematic non-linearities. The constitutive equations are of a modified Prandtl-Reuss type, modeling the elastic-plastic behaviour of the material.

In the second part of the paper, the results of testing the so-developed finite element code are given. The tests are done both theoretically and experimentally. The comparisons yield satisfactory agreements.

## KAYNAKÇA

- 1 Roll, K. ve Tekkaya, A.E., Prozesssimulation in der Umformtechnik mit der Methode der Finiten Elemente- Stand und Entwicklungstendenzen. 1. Kısım: *Draht* 36 (1985) 5, 213-218, 2. Kısım: *Draht* 36 (1985) 6, 280-283.
- 2 Hill, R., Some Basic Principles in the Mechanics of Solids Without a Natural Time. *J. Mech. Phys. Solids*, 7 (1959), 209-225.
- 3 Ramm, E., Geometrisch nichtlineare Elastostatik und Finite-Elemente. *Habilitationschrift*, Universitaet Stuttgart, 1976.
- 4 McMeeking, R.M. ve Rice, J.R., Finite-Element Formulations for Problems of Large Elastic-Plastic Deformation. *Int. J. Solids Structures* 11 (1975), 601-616.
- 5 Tekkaya, A.E., Roll, K., Gerhardt, J., Herrmann, M. ve Du, G., Finite-Element-Simulation of Metal Forming Processes Using Two Different Material Laws. *Simulation of Metal Forming Processes by the Finite Element Method (SIMOP-I)*. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, 1986, 50-85.
- 6 Lubarda, V.A., Elastic-Plastic Deformation at Finite Strain. *Ph.D.-Tezi*, Stanford University, 1980.
- 7 Yamada, Y., Yoshimura, N. ve Sakurai, T., Plastic Stress Strain Matrix and its Application for the Solution of Elastic-Plastic Problems by the Finite-Element-Method. *Int. J. Mechanics*, 10 (1986), 343-354.
- 8 Eringen, A.C., *Mechanics of Continua*. John Wiley and Sons: New York, 1967.
- 9 Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method*. McGraw Hill: London, 3. Baskı, 1977.
- 10 Gallagher, R.H., *Finite Element Analysis, Fundamentals*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- 11 Tekkaya, A.E., *Ermittlung von Eigenspannungen in der Kaltmassivumformung*. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg New York/Tokyo, 1986.
- 12 Du, G., Untersuchung über die numerische Genauigkeit der Berechnungen von Problemen der Kaltmassivumformung mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente. *Diplom-Ingenieur Tezi* (Danışman: A.E.Tekkaya), Universitaet Stuttgart, 1985.

- 13 Yamada, Y., Wifī, A.S. ve Hirakawa, T., Analysis of Large Deformation and Stress in Metal Forming Processes by the Finite Element Method. **Metal Forming Plasticity**. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/New York, 1979, 158-176.
- 14 Wang, N.-M. ve Tang, S.C., Applications of the Finite-Element-Method to Sheet Metal Flanging Operations. **Simulation of Metal Forming Processes by the Finite-Element-Method**. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, 1986, 279-306.
- 15 Nester, W. ve Pöhlandt, K., Ermittlung von Fließkurven in Verschiedenen Ausführungsform des Stauchversuches. **Rheologica Acta**, 21 (1985), 409-412.
16. Gunasekera, J.S., ravranek, J. ve Littlejohn, M., The Effect of Specimen Size on Stress-Strain Behaviour in Compression. **J. Engineering Materials and Technology**, **Trans. ASME**, 104 (1982) 10, 274-279.
- 17 Lange, K., **Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft**, Cilt 1 (Grundlagen), 2. Baskısı. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/New York/ Tokyo, 1984.
- 18 Lange, K., **Lehrbuch der Umformtechnik**, Cilt 2 (Massivumformung). Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/New York, 1974.
- 19 Tekkaya, A.E. ve Gerhardt, J., Residual Stresses in Cold-Formed Workpieces. **Annals of the CIRP**, 34/1 (1985), 225-230.
- 20 Roll, K., **Einsatz numerischer Naehrungsverfahren bei der Berechnung von Verfahren der Kaltmassivumformung**. Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg/New York, 1982.
- 21 Tekkaya, A.E. ve Roll, K., Analysis of Metal Forming Processes by Different Finite Element Methods. **Numerical Methods for Nonlinear Problems**. Pineridge-Press: Swansea, 1984, 450-461.
- 22 Sachs, G., Der Nachweis innerer Spannungen in Stangen und Rohren. **Z. Metallkunde** 19 (1927) 9, 352-357.
- 23 Macherauch, E. ve Müller, P., Das  $\text{Sin}^2\psi$ -Verfahren der röntgenographischen Spannungsmessung. **Z. angew. Physik**, 13 (1961), 305-312.
- 24 Horlacher, U., Experimentelle Ermittlung von Eigen-Spannungen in VVEP-Teilen. **Diplom-Ingenieur Tezi**, (Danşman: A.E. Tekkaya), Universitaet Stuttgart, 1984.

# Ağır Şartlarda Kinematik Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Metin AKKÖK

Doç.Dr.,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Ankara

Ağır şartlarda (yüksek hız ve/veya ağır yüklerde) kuru sürtünme katsayısının belirlenmesinde ısıl etkenlerin varlığı incelenmiştir. Sürtünme nedeni ile oluşan sıcaklığın sürtünen malzemelerden ergime (veya çözülme) sıcaklığı küçük olan ile sınırlanacağından hareket ederek bir model geliştirilmiştir. Blok tarafından geliştiriler basitleştirilmiş yüzey sıcaklık artış teorisi sürtünme katsayısını verecek şekilde yeniden yazılmıştır. Ağır şartlarda sürtünme katsayısını belirleyen ana etkenler; kayma hızı, yük, malzemenin ergime (veya çözülme) sıcaklığı, sertliği ve ısıl özellikleri olarak bulunmuştur. Bu modelin geçerliliği yayınlanmış bir çok deneysel çalışma ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

## GİRİŞ

Malzemelerin kuru sürtünme katsayıları değişik çalışma şartlarında büyük farklılıklar göstermektedir. Sürtünme kuvvetine malzeme yüzeyindeki mikro boyutlardaki pürüzlerin neden olduğu bilinmektedir. Pürüzlerin yük altında kaynaması ve kayma hareketi ile de bu bağların kesilmesi olarak bilinen yapışma modeli ve yüzeylerden daha sert olanın pürüzlerinin yumuşak olan yüzeyi çizmesi (kazınması) olarak bilinen klasik sürtünme modelleri sürtünme katsayısındaki büyük farkları yeterince açıklayamamaktadır.

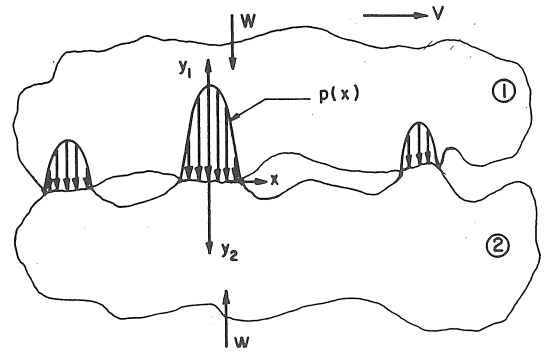
Kuru sürtünme katsayısı özel olarak seçilen deney şartlarında belirlenir. Özellikle çalışma şartlarının, sürtünmeden doğan ısının sürtünme katsayısını etkilemeyecek şekilde düzenlenmesi gereklidir. Böyle durumlarda sürtünme katsayısı yapışma ve şekil değiştirme bileşenleri ile belirlenir. Özellikle ergime sıcaklığına yakın çalışma şartlarında veya malzemenin mekanik özelliklerinin değiştiği çözülme (kimyasal olarak) sıcaklığına yakın çalışma şartlarında sürtünme sonucu üretilen ısı ile malzemenin yüzey sıcaklığı, ergime (veya çözülme) sıcaklığına erişebilir.

Bu çalışmada ağır şartlarda (yüksek hız ve/veya ağır yüklerde) sürtünme ile üretilen ısı enerjisinin yüksek olması ve bu ısının yeterince hızlı iletilememesi durumu incelenmiş ve ısıl etkenlerin varlığı gösterilmiştir.

## DÜZGÜN OLMAYAN YÜZEYLER İÇİN SÜRTÜNME KATSAYISI

Yüzeyleri düzgün olmayan iki cisim sabit relatif  $V$  hızı ile kaymakta iken birbirlerine karşı yüklenmesi durumunda temas Şekil 1'de görüleceği gibi birden fazla küçük alan üzerinde olacaktır ve bu temas alanları devamlı olarak değişecektir. Temas alanlarında farklı elastik ve plastik şekil değişikliğine bağlı olarak oluşan temas basıncı dağılımı,  $p(x)$ , nedeni ile birim alanda yerel olarak bir anlık üretilen ısı;

$$q(x) = \mu(x) P(x)V \quad (1)$$



Şekil 1 Düzgün olmayan yüzeylerdeki değişken temas alanları

şeklinde yazılabilir. Burada  $\mu(x)$  yerel sürtünme katsayısıdır. Bu ısı kayan ve sabit yüzeye iletilecektir. Kayan ve sabit yüzeyler için sıcaklık dağılımları  $T_1(x, y_1)$  ve  $T_2(x, y_2)$ , ısı iletkenlik katsayıları  $k_1$  ve  $k_2$  olarak tanımlanırsa yerel olarak üretilen ısı için denge denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\mu(x)P(x)V = k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial y_1} \right|_{y_1=0} + k_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial y_2} \right|_{y_2=0} \quad (2)$$

Bu denklem verilen bir temas basınç dağılımı ve kayma hızı için bilinen konvansiyonel sayısal yöntemler kullanılarak sürtünme katsayısını lokal olarak verecek şekilde çözülebilir [1].

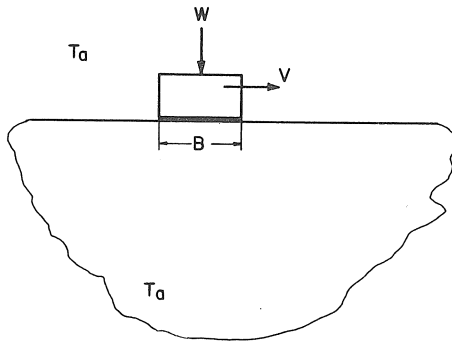
Bu yöntemle sürtünme katsayısı için hassas değerler elde etmek mümkün olmasına karşın sürtünen yüzeylerin mikro boyuttaki geometrisinin bilinmesini ve aşırı derecede bilgisayar zamanı ve belleği gerektirdiği için çok kullanışlı olmamaktadır. Bunun yerine düz yüzeyler için geliştirilmiş olan sürtünen yüzeylerdeki sıcaklık artışını analitik olarak veren basitleştirilmiş model kullanılacaktır.

### DÜZ YÜZEYLER İÇİN SÜRTÜNMEDE SICAKLIK ARTIŞI

Şekil 2'de görüldüğü gibi yarı-sonsuz bir cismin düz yüzeyi üzerinde sabit bir  $W$  yükü altında  $V$  hızı ile kaymakta olan diğer bir cisim düşünelim. İki yüzey arasındaki sürtünme katsayısı,  $\mu$ , nedeni ile birim temas alanında üretilen ısı,  $q$ , aşağıdaki denklemle verilir.

$$q = \mu PV \quad (3)$$

Burada  $P$  yük altında yüzeylerdeki temas basıncıdır. Böylece sürtünmede sıcaklık artışı  $V$  hızı ile hareket etmekte olan  $q$  şiddetindeki bir ısı kaynağı modeli ile bulunabilir. Isı kaynağının yeterince hızlı kaydığı durumlarda hareketli yüzey sürekli olarak çalışma ortam sıcaklığındaki,  $T_a$ , daha soğuk yüzeye temas edecektir ve belli bir süreli sıcaklığa erişecektir. Bu nedenle üretilen ısının büyük bir kısmı daha soğuk olan sabit yüzeye iletilecektir [2]. Isının malzemeye iletileme derinliği



Şekil 2 Yarı-sonsuz cisim üzerinde yük altında kayan cisim

temas yüzeyi boyutlarına göre küçük olmaktadır. Bu nedenle ısının yatay yönde akışı ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu varsayımı ile ısı iletimi bir boyutlu ısı akış problemi olarak düşünülebilir ve yüzeydeki sıcaklık,  $T_{\bar{u}}$ , artışı aşağıdaki denklemle verilir [1].

$$T_{\bar{u}} - T_a = 2q \left( \frac{t}{\pi k \rho c} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Burada  $k$ ,  $\rho$  ve  $c$  sabit yüzeyin sırasıyla ısı iletkenlik katsayısı, özgül kütlesi ve ısı kapasitesidir. Bu denklem sabit yüzey üzerindeki herhangi bir noktadaki sıcaklık artışını ısı akışının uygulandığı süre,  $t$ , ile vermektedir. Kayma yönünde ısı kaynağı boyu  $B$  olarak alınır, en yüksek sıcaklık ısı kaynağının arka kenarındaki noktada olacaktır.  $t = B/V$  ilişkisi denklem (4)'de yerine konulursa en yüksek sıcaklık artışı aşağıdaki denklemle verilir.

$$T_{\max} - T_a = 2q \left( \frac{B}{\pi V k \rho c} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Buradan görüldüğü gibi sıcaklık artışı uygulanan ısı akışı ile doğru orantılıdır. Ağır şartlarda üretilen sürtünme enerjisinin yüksek olmasıyla yüzeydeki en yüksek sıcaklık malzemelerden ergime (veya çözülme) sıcaklığı düşük olana erişir. Fakat bu değeri aşamaz. Bu durumda sıcaklık artışı sınırlanmış olacağından ısı iletimi de sınırlanacak ve çalışma şartlarının ağırlaşması durumunda üretilen enerji sürtünme katsayısının azalması ile sabit bir değere kalabilecektir.

### SÜRTÜNME KATSAYISININ BELİRLENMESİ

Ağır şartlarda aşırı sürtünme enerjisi üretimi ile en yüksek sıcaklığın malzemelerden ergime (veya çözülme) sıcaklığı düşük olanla sınırlanması sıcaklık artışını belirler. Bu nedenle sıcaklık artışı denklemi (5) sürtünme katsayısını bağımsız bir parametre olarak verecek şekilde yazılabilir.

### Tam Yüzey Teması

Yüzey pürüzlülüğü olmayan ideal düz yüzeyler için veya çok küçük temas yüzeyleri için yükün tüm yüzeye eşit dağıldığı kabul edilebilir. Bu durumda yük ile temas basıncı doğru orantılı olarak değişecektir. (3) numaralı denklemle verilen sürtünme ısısı (5) numaralı denklemde yerine koyularak sürtünme katsayısı çözümlerse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\mu = C \frac{T_d - T_a}{P} \left( \frac{k \rho c}{VB} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Burada  $C$  bir sabit olup aşağıda tartışılacaktır.  $T_d$ , kayan veya sabit yüzeyin ergime (veya çözülme) sıcaklığı (hangisi küçük ise) ve  $T_a$  çalışma ortamı sıcaklığıdır.

Böylece sürtünme katsayısının yük ile ve kayma hızının karekökü ile ters orantılı olarak değiştiği görülür.

Eşitlik (6) en yüksek yüzey sıcaklığının temas alanının çıkış kenarında olması varsayımına dayanarak elde edilir. Diğer bir varsayım da sürtünme ile üretilen tüm ısının yarı-sonsuz cisme iletilmiş olmasıdır. Gerçekte az da olsa üretilen ısının bir kısmı kayıcıya iletilirken diğer kısmı da yarı-sonsuz cisme iletilir. C katsayısının (6) numaralı denklemdaki değeri  $\sqrt{\pi/2} = 0.886$ 'dır. Eğer en yüksek sıcaklık ortalama bir yüzey sıcaklığı olarak alınırsa  $C = 1.46$  kullanılabilir [3]. Sabit sıcaklıktaki bir ısı kaynağı için yapılan bir model ile de bu katsayı 2.0 olarak bulunmuştur [4] ve bu değer kullanılacaktır.

### Kısmi Yüzey Teması

Bilindiği gibi gerçek yüzeyler pürüzlülük nedeni ile birden fazla noktada temas ederler. Bu temas noktaları aşırı yük ile elastik ve plastik şekil değişikliğine uğrayabilir. Burada karşılaşılan iki büyük zorluk vardır. Bunlardan birincisi gerçek temas basıncı değerinin bilinmesidir. Temas noktalarında alanın küçük olduğu varsayımı ile tüm temas noktalarının plastik şekil değişikliğine uğradığı kabul edilebilir. Bu nedenle gerçek temas basıncı olarak malzemelerden yumuşak olanın iz sertliği (akma sertliği)  $P_h$  alınabilir. Diğer bir bilinmeyen de temas noktalarının sayısıdır. Temas noktalarının alanın küçük olması nedeniyle dairesel olarak alınabilir. Ortalama çap B olarak alınırsa, n temas noktası için yük ile gerçek temas basıncı ve alanı arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{\pi B^2}{4} \cdot n \cdot P_h = W \quad (7)$$

Buradan B boyutunu çözüp (6) numaralı denkleme yerine koyarak ve (3) no.lu denkleme temas basıncı olarak  $P_h$  alınarak sürtünme katsayısı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

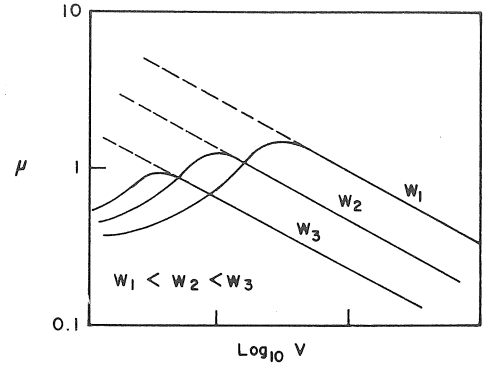
$$\mu = 1.88 \frac{T_d - T_a}{P_h^{3/4}} \cdot \left(\frac{k\rho c}{V}\right)^{1/2} \left(\frac{n}{W}\right)^{1/4} \quad (8)$$

Buradan sürtünme katsayısının  $\mu \propto V^{-1/2} W^{-1/4}$  değiştiği görülür. Temas halindeki geniş yüzeyli cisimlerin sürtünme katsayısının bulunması için temas noktası sayısının bilinmesi gereklidir. Yükün yüzeyler arasında üç noktada taşındığı varsayımı ile mikroskopik temas alanlarının üç büyük temas alanında toplandığı düşünülebilir. Bu şekilde kısmi yüzey teması için geliştirilmiş olan eşitlik (8) geniş yüzeyli cisimler için  $n = 3$  alınarak kullanılabilir. Sürtünme katsayısının  $n^{1/4}$  ile değişmesi bu sayının etkisinin kuvvetli olmadığını göstermektedir.

### SÜRTÜNME MODELİNİN DENEYSEL BULGULARLA KARŞILAŞTIRILMASI

#### Hızın Etkisi

Sürtünme katsayısının ısıl etkenlerle belirlenmesinde en önemli şart sürtünmenin ağır şartlarda gerçekleşmesi ve bu nedenle de üretilen ısının yüksek olmasıdır. Bu özellik sürtünme katsayısının

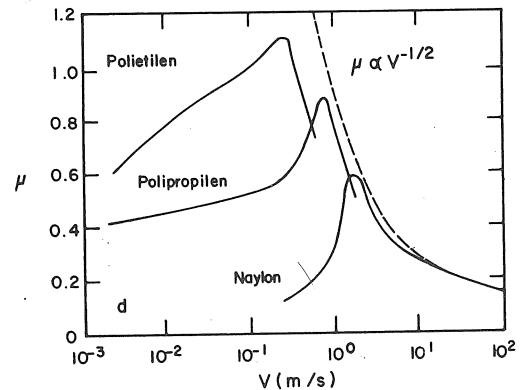


Şekil 3 Sürtünme katsayısının karakteristik değişimi

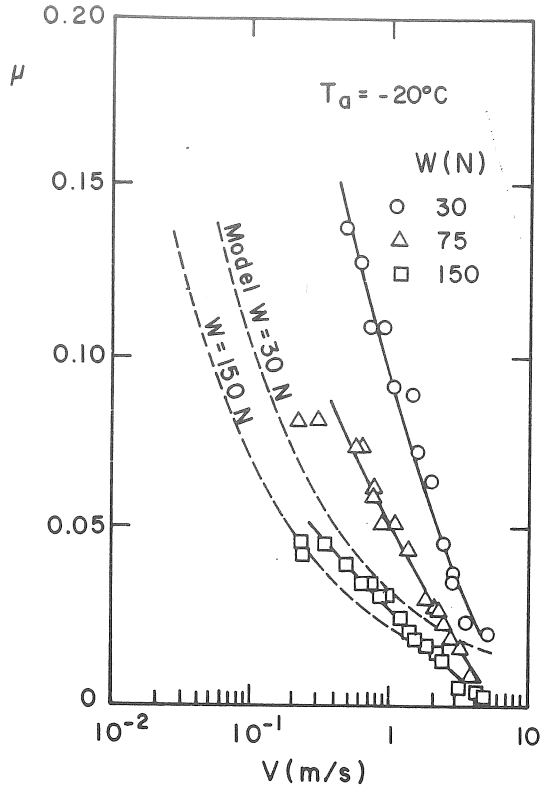
değişik yükler için hız ile değişimini gösteren bir grafikte gösterilebilir. Şekil 3'de düşük hızlar için yüzey sıcaklığı ergime (veya çözülme) sıcaklığına erişemediği için yukarıda bahsedilen model geçerli değildir. Bu durumda sürtünme yüzey pürüzlerinin yapışma-kesilme ve şekil değiştirme (kazıma) bileşenleri ile belirlenir. Düşük hızlarda sabit yükler için sürtünme katsayısının hız ile arttığı bilinmektedir. Bu artış sürtünmenin ısıl etkenlerle belirlenmeye başladığı  $\mu \propto V^{-1/2}$  eğrisine erişinceye kadar devam eder ve bundan sonra sürtünme katsayısı hız ve yük ile düşmeye başlar (Şekil 3).

Bu özelliğin deneysel olarak gösterilmesinde en belirgin örnek Şekil 4'de görülmektedir. Burada üç polimerin çelik yüzeyi üzerindeki sürtünme katsayısının kayma hızına göre değişimi verilmektedir [5]. Çözülme sıcaklıklarının farklı olması nedeni ile (Polietilen:80°C, Polipropilen:145°C, Naylon:250°C) sürtünme katsayısının ısıl etkenlerle belirlenmeye başladığı sınır bölgesi açık bir şekilde artan hızlarda görülmektedir. Burada kesik çizgi ile gösterilen eğri Naylon için 10 m/s'deki deneysel değerinden geçen  $\mu \propto V^{-1/2}$  eğrisidir.

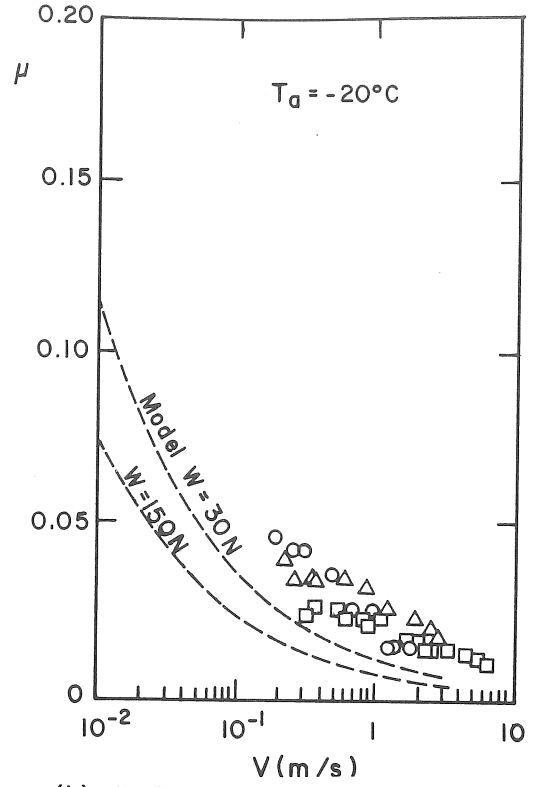
Sürtünme katsayısını etkileyen faktörlerin belirlenmesi için yapılan bir çalışmada ergime sıcaklığı düşük olan buz ile farklı ısıl temas katsayısı olan malzemeler arasındaki sürtünme katsayısının değişimi deneysel olarak incelenmiştir [6]. Şekil



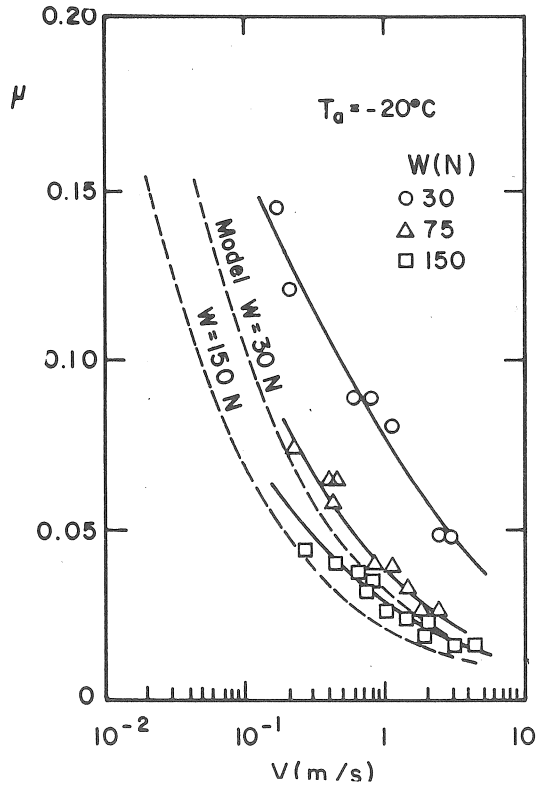
Şekil 4 Üç polimer için sürtünme katsayısının hıza göre değişimi



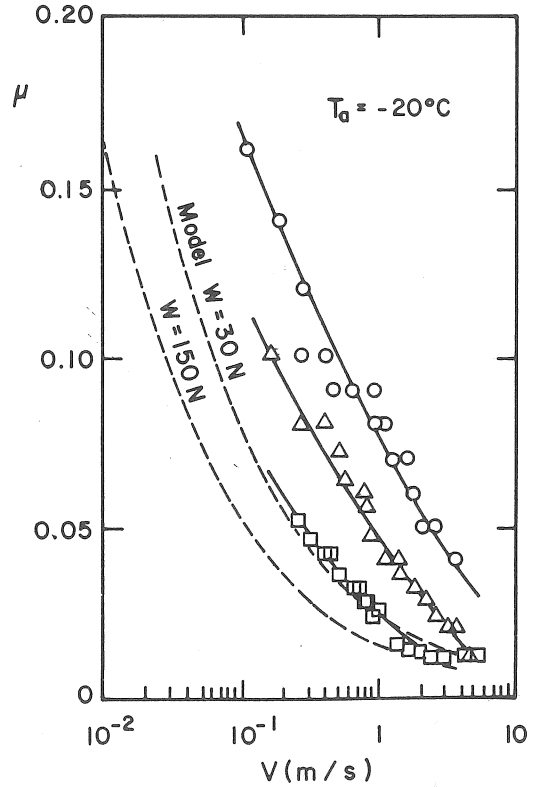
(a) Buz üzerinde naylon kayıcılar



(b) Naylon üzerinde buz kayıcılar



(c) Buz üzerinde cam kayıcılar



(d) Cam üzerinde buz kayıcılar

Şekil 5 Naylon ve cam ile buz arasındaki sürtünme katsayısının değişimi

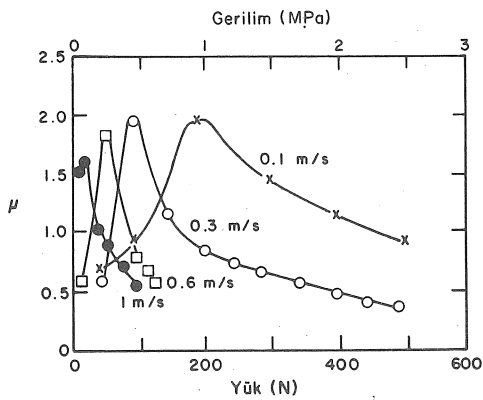
5a,b'de Naylon ile buz arasındaki sürtünme katsayısının hızla göre değişimi çeşitli yükler için verilmiştir. Aynı şekilde cam ile buz için sürtünme katsayısı değişimi Şekil 5c,d'de verilmiştir. Burada kesik çizgi ile gösterilen sürtünme katsayısı değişimleri kısmi temas için (8) numaralı denklemden elde edilmiştir. Buz için ergime sıcaklığı  $0^{\circ}\text{C}$  olmasına rağmen iz sertliği bu sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklıkta (yaklaşık  $-1^{\circ}\text{C}$ 'de) ani bir düşme göstermekte ve yumuşama meydana gelmektedir [7]. Bu fark ihmal edilerek en yüksek yüzey sıcaklığı sınırı olarak  $0^{\circ}\text{C}$  alınmıştır. Buzun sertliğinin sıcaklığa göre değişimi Barnes ve Tabor [7]. tarafından ölçülmüş ve  $-10^{\circ}\text{C}$ 'den daha düşük sıcaklıklar için sertliğin değişiminin az olduğu gözlenmiştir. Bu değerler kullanılarak  $-20^{\circ}\text{C}$ 'deki çalışma sıcaklığı için buzun iz sertliği yaklaşık olarak  $P = 100$  MPa alınmıştır. Bu deneyler üç silindirik kayıcı ile buz üzerinde yapıldığı için burada  $n = 3$  alınmıştır. Çeşitli deney grupları için yaklaşık olarak  $\mu \propto V^{-0.34}$  ile  $\mu \propto V^{-0.58}$  arasında değiştiği görülmüştür.

### Yükün Etkisi

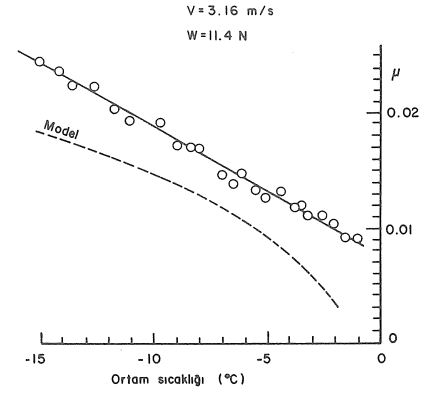
Sürtünmenin ısı etkenlerle belirlendiği şartlarda sürtünme katsayısı yükün artması ile azalmaktadır. Kısmi temas olan yüzeyler için  $\mu \propto W^{-0.25}$  ve tam temaslı yüzeyler için  $\mu \propto W^{-1}$  olarak bulunmuştur.

Bu bulguların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması için Naylon'un çelik üzerindeki sürtünme katsayısının sabit hızlar için yüke göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir [8]. Burada ısı etkilerinin başlangıç yükün artması ile açık bir şekilde görülmektedir. Hız arttıkça ısı etkilerinin başlaması daha hafif yüklerde olmaktadır. Sürtünme katsayısının değişimi yaklaşık olarak  $\mu \propto W^{-1}$  eğrisini takip etmektedir.

Buz üzerinde naylon, cam, çelik kayıcılar ve naylon, cam, çelik üzerinde buz kayıcılar ile yapılan deneylerden yaklaşık olarak  $\mu \propto W^{-0.55}$  ile  $\mu \propto W^{-0.58}$  arasında değiştiği görülmüştür [6]. Bu değerler kısmi ve tam temas durumları için olan değerler arasındadır.



Şekil 6 Çelik üzerinde naylon kayıcılar için sürtünme katsayısının değişimi



Şekil 7 Buz üzerinde çelik kayıcılar için ortam sıcaklığının sürtünme katsayısına etkisi

### Ortam Sıcaklığının Etkisi

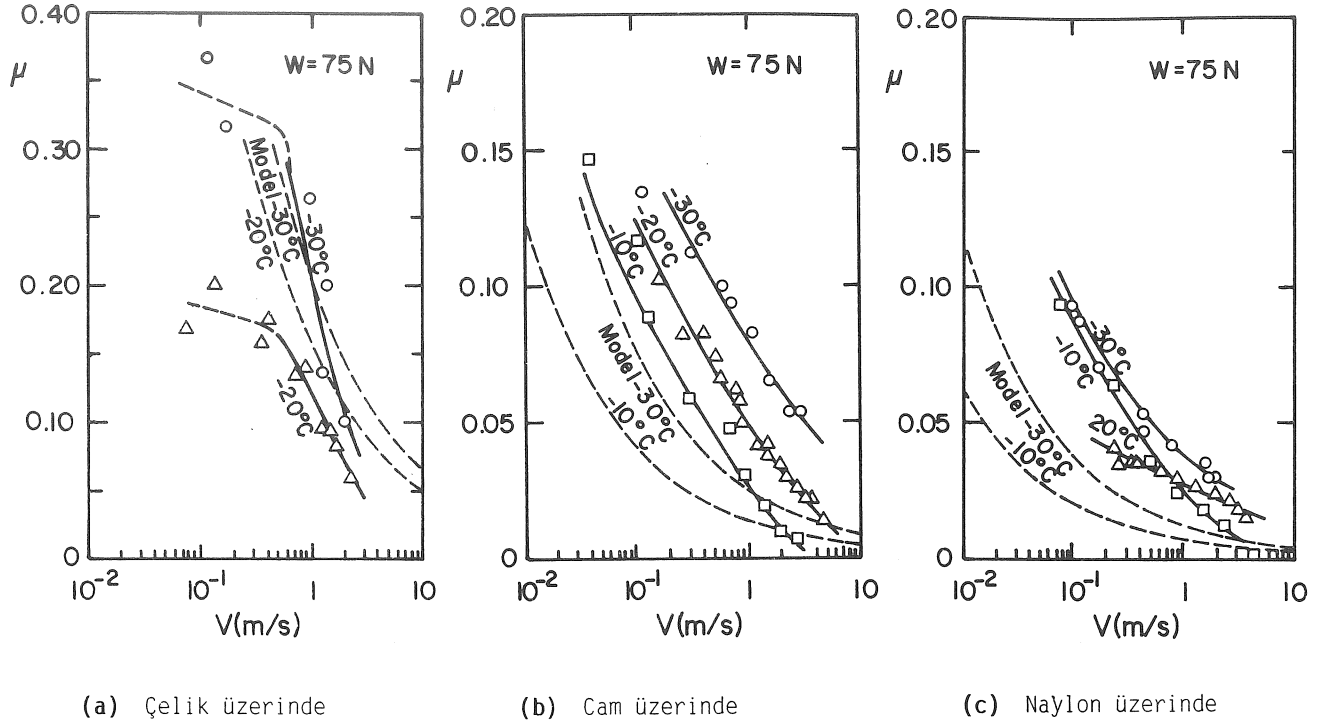
Şekil 7'de Evans ve diğerleri [9] tarafından deneysel olarak elde edilen buz üzerinde çelik kayıcılar için sürtünme katsayıları verilmiştir. Bu deneylerde çelik kayıcı bir noktada buz yüzeyine yüklendiğinden  $n = 1$  alınarak elde edilen sürtünme katsayısı değerleri kesik çizgi ile gösterilmiştir. Sürtünme katsayısının ortam sıcaklığı  $0^{\circ}\text{C}$ 'ye yaklaşıırken doğrusal olarak değişmesinin nedeni buz sertliğinin düşmesidir. Şekil 8'de buz kayıcıların çeşitli malzemeler üzerindeki sürtünme katsayılarının değişimi aynı yük değeri için verilmiştir [6]. Bu deney sonuçlarından, çeşitli deney grupları için  $\mu \propto (T_d - T_a)^{0.69}$  ile  $\mu \propto (T_d - T_a)^{0.82}$  arasında değiştiği bulunmuştur.

### SONUÇ

Ağır şartlarda sürtünme ile üretilen ısının yüksek olması nedeni ile sürtünme katsayısının ısı etkenlerle belirlendiği gösterilmiştir. Sürtünmede en yüksek sıcaklığın malzemelerden ergime (veya çözülme) sıcaklığı düşük olan ile sınırlanması ısı iletimini de sınırlamaktadır. Bu nedenle sürtünme katsayısını belirleyen en önemli etkenlerden birisi sürtünen malzemelerin ergime (veya çözülme) sıcaklığı olacaktır. Sürtünme katsayısının hız, yük ve ortam sıcaklığının artması ile azaldığı gösterilmiştir. Bu bulguların yayınlanmış deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalarında uyum sağlandığı gözlenmiştir.

### DETERMINATION OF KINETIC COEFFICIENT OF FRICTION UNDER SEVERE CONDITIONS

The concept of thermal control of dry friction coefficient under severe sliding conditions is investigated. A model is developed by considering the maximum temperature occurring in dry sliding which is the decomposition temperature of the slider or counterface (whichever temperature is lower). Blok's flash



Şekil 8 Buz kayıcıların çeşitli malzemeler üzerindeki sürtünme katsayılarının sıcaklığa göre değişimi

temperature theory is manipulated to give the coefficient of friction as a dependent parameter. Under severe sliding conditions the principal factors controlling friction appear to be the sliding velocity, load, and the melting (or decomposition) temperature, hardness and thermal properties of the materials. The model is compared with several sets of experimental results, available in the literature.

#### KAYNAKÇA

- 1 Ettles, C., "The Thermal Control of Friction at High Sliding Speeds", *Trans. ASME*, 85-Trib-37, (1985).
- 2 Blok, H., "Theoretical Study of Temperature Rise at Surfaces of Actual Control Under Oiliness Lubricating Conditions", *I. Mech. E., Proc.*, 2 (1937), 225-235.
- 3 Archard, J.F., "Elastic Deformation and the Laws of Friction", *Proc. Roy. Soc. (London)*, A 243, (1958), 190-225.
- 4 Ettles, C., "Heat Generation and Friction in Rotating Bands", *ASLE Preprint*, 85-AM-1A-1, (1985).
- 5 McLaren, K.G. ve Tabor, D., "Friction of Polymers: Influence of Speed and Temperature", *Nature*, 197, (1963), 856-858.
- 6 Akkök, M., Ettles, C. ve Calabrese, S.J., "Parameters Affecting the Kinematic Friction of Ice", *Trans. ASME, Jour. of Tribology*'de yayınlanacak, (1986).
- 7 Barnes, P. ve Tabor, D., "Plastic Flow and Pressure Melting in the Deformation of Ice", *Nature*, 210 (1966), 873-883.
- 8 Watanabe, M., Karasawa, M. ve Matsubara, K., "The Friction Properties of Nylon", *Wear*, 12 (1968), 185-192.
- 9 Evans, D.C.B., Nye, J.F. ve Chessman, K.J., "The Kinematic Friction of Ice", *Proc. Roy. Soc.*, S.347, (1976), 473-512.



# Robot Kolların Zaman ve Enerji Açısından Optimal Kontrolü

M.Kemal ÖZGÖREN

Doç.Dr.,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Ankara

Bu bildiride n serbestlik dereceli bir robot kolun belirtilen iki konum arasında optimal olarak hareket ettirilmesi problemi ele alınmıştır. Optimizasyon, harcanan zaman ve enerjiyi belli oranlarda içeren bir performans ölçüsünün minimum yapılması ile gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sırasında, sürücü kuvvet ve momentlerin büyüklüğe sınırlı oldukları da göz önüne alınmıştır. Optimizasyon sonucunda ortaya çıkan kontrol kuralı, sürücü kuvvet ve momentlerden her birinin üç konumlu olarak yani (-max, 0, +max) değerlerinden birini alacak biçimde uygulanmasını gerektirmektedir. Bu üç değer birinden diğerine geçişin görüleceği dönüşüm zamanları, eklem değişkenlerinin türevlerinin çözüm sonucu elde edilen özel fonksiyonlara eşit oldukları zamanlar olarak belirlenmektedir. Optimal çözümü verilen bir ilk konum yerine, parametrik olarak belirlenen bir ilk konum kümesi için elde etmek ve daha sonra verilen ilk konumu sağlayan çözümü interpolasyon yolu ile bulmak daha kolay ve uygun olmaktadır. Bildiride geliştirilen optimizasyon yöntemi örnek olarak üç uzuvlu bir robot kola uygulanmıştır.

## GİRİŞ

Robot kolların sıklıkla kullanıldığı alanlardan biri de bir cismi bir konumdan diğer bir konuma iletmektir. Bu amaçla yapılacak ilk iş, eklem değişkenlerinin söz konusu cismin ilk ve son konumlarına karşılık gelen değerlerinin "ters kinematik" yöntemleri ile belirlenmesidir. Daha sonra, uygun bir "hareket planlaması" yöntemi ile, eklem değişkenlerinin ara değerleri ve bu değerleri sağlayacak sürücü kuvvet veya momentler belirlenir [1], [2].

Hareket planlaması için kullanılacak çeşitli yöntemlerden biri de seçilecek uygun bir kritere göre "optimizasyon" yapmaktır. Optimizasyon için seçilebilecek kriterler; minimum zaman, minimum enerji veya her ikisinin uygun bir kombinasyonu olabilir. Yalnızca minimum zaman ve yalnızca minimum enerji kriterlerine göre 3 uzuvlu robot kollar üzerinde yapılmış bazı çalışmalar daha önce görülmüştür [3], [4]. Bu bildiride ise, optimizasyon kriteri olarak hem zamanı hem de enerjiyi belli bir oranda içeren bir fonksiyonun minimizasyonu ele alınmış ve n uzuvlu bir robot kola uygulanmıştır.

Göz önüne alınan robot kolun "doğrudan sürümlü (direct drive)" olduğu varsayılmış ve robot kolun dinamiği Lagrange Denklemleri ile ifade edilmiştir. Optimizasyon problemi; son konumu sabit, ilk konumu ise serbest tutup daha genel bir biçimde ele alınarak "dinamik programlama" yöntemi ile çözülmüştür. Böylece, istenen bir son konuma, belli bir ilk konum yerine, bir "ilk konum kümesi"nden optimal olarak ulaşma olanağı sağlanmıştır. Ayrıca, optimizasyon sırasında sürücü kuvvet veya momentlerin büyüklüklerinin sınırlı olduğu da göz önüne alınmıştır. Buna göre bulunan optimal çözüm, sürücü kuvvet veya momentlerden her birinin üç konumlu (-max, 0, +max) kontrol biçiminde uygulanmasını gerektirmektedir. Çözümün zor kısımlarından biri, kontrolün bir konumdan diğerine dönüşeceği "dönüşüm zamanları"nın (switching times) belirlenmesidir. Bu amaçla hazırlanan bilgisayar programı, optimal hareketi ifade eden diferansiyel denklemleri son konumdan başlayarak geriye doğru integre edip hem dönüşüm zamanlarını hem de eklem değişkenlerinin optimal değişimlerini belirlemektedir.

Ancak, bu integrasyon, son konuma ait parametrelerin ve hareket süresinin seçilen değişik değerlerine göre değişik ilk konumlarla sonuçlanmakta ve böylece, daha önce de söylendiği gibi, bir ilk.konum kümesi ortaya çıkmaktadır. Bu durum, ilk konumda görülebilecek pertürbasyonlar açısından avantajlı olmaktadır. Fakat, öte yandan, verilen bir ilk konuma bu ilk konum kümesi içinde en yakın ilk konumların aranması ve gerekiyorsa interpolasyon yapılması, problemin zor kısımlarından bir diğerini oluşturmaktadır.

## DİNAMİK DENKLEMLER

Uzuv sayısı  $n$  olan bir robot kola ait dinamik denklemlerin Lagrange Formülasyonu ile çıkarılışı, çeşitli kaynaklarda gösterilmiştir [2], [5]. Bu denklemler, matris/vektör gösterimiyle şöyle yazılabilir:

$$\hat{M}(\bar{q})\ddot{\bar{q}} + \bar{C}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + \bar{W}(\bar{q}) = \bar{\tau} \quad (1)$$

Burada, vektörler ( $\bar{\cdot}$ ) ile, kare matrisler ( $\hat{\cdot}$ ) ile, ve zamana göre alınan türevler ( $\dot{\cdot}$ ) ile gösterilmiştir. Kullanılan sembollerin anlamları ise aşağıdadır:

- $\bar{q}$  : Eklem değişkenleri vektörü;  
 $\bar{\tau}$  : Sürücü kuvvet veya momentlerden oluşan kontrol değişkenleri vektörü;  
 $\bar{C}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$  : Merkezkaç, Coriolis ve viskoz sürtünme etkilerini içeren vektörel fonksiyon;  
 $\bar{W}(\bar{q})$  : Uzuvların ve taşınan cismin ağırlıklarının etkisini gösteren vektörel fonksiyon;  
 $\hat{M}(\bar{q})$  : Kütle matrisi (uzuvların kütle ve eylemsizlik momentleri ile eklem değişkenlerine bağlı matris)

Yukarıdaki ikinci mertebeden  $n$  diferansiyel denklem, aşağıdaki birinci mertebeden  $2n$  diferansiyel denkleme dönüştürülerek de yazılabilir:

$$\dot{\bar{q}} = \bar{v} \quad (2a)$$

$$\dot{\bar{v}} = \bar{f}(\bar{q}, \bar{v}) + \hat{N}(\bar{q})\bar{\tau} \quad (2b)$$

Burada şu tanımlar kullanılmıştır:

$$\hat{N}(\bar{q}) = [\hat{M}(\bar{q})]^{-1} \quad (3)$$

$$\bar{f}(\bar{q}, \bar{v}) = -\hat{N}(\bar{q})[\bar{C}(\bar{q}, \bar{v}) + \bar{W}(\bar{q})] \quad (4)$$

(2a,b) diferansiyel denklemleri için belirtilen sınır koşulları ise şunlardır:

$$\bar{q}(0) = \bar{q}^0, \quad \bar{v}(0) = \bar{v}^0; \quad (5)$$

$$\bar{q}(T) = \bar{q}^*, \quad \bar{v}(T) = \bar{v}^* \quad (6)$$

Burada başlangıç zamanı 0, bitiş zamanı ise  $T$  olarak alınmıştır.  $T$  henüz belli değildir ve optimal olarak bulunması istenmektedir. İlk ve son konumları gösteren  $\bar{q}^0$  ve  $\bar{q}^*$  vektörleri ile eklem motorlarının bu konumlardaki hızlarını gösteren  $\bar{v}^0$  ile  $\bar{v}^*$  vektörleri, robot kol tarafından taşınacak olan cismin istenen ilk ve son konumlarına ve hızlarına göre **ters kinematik** yöntemleri ile belirlenirler. Bir çok durumda  $\bar{v}^0 = \bar{v}^* = \bar{0}$  olursa da; bazı durumlarda, örneğin cisim bir konveyörden başka bir konveyöre taşınacaksa,  $\bar{v}^0 \neq \bar{0}$ ,  $\bar{v}^* \neq \bar{0}$  olabilir.

(1) ya da (2b) sayılı denklemlerde belirtilmesi gereken bir husus da kontrol değişkenlerinin ( $\bar{\tau}$  vektörünün bileşenlerinin) aşağıda gösterilen biçimde kısıtlanmış olmalarıdır:

$$-T_i \leq \tau_i \leq T_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

Burada  $T_i$ ,  $i$  sayılı eklem motoru tarafından uygulanabilecek maksimum kuvvet veya momenti göstermektedir. Her ne kadar  $T_i$  genelde  $i$  sayılı eklem değişkeninin türevine ( $\dot{v}_i$ 'ye) bağlı olabilirse de, bu bildiride matematik modeli fazla karmaşık hale getirmemek için sabit olduğu varsayılmıştır.

## OPTİMİZASYON

Kontrol vektörü  $\bar{\tau}$  ile bitiş zamanı  $T$ 'yi optimal olarak belirlemek üzere minimum yapılacak olan **Masraf Fonksiyoneli** aşağıda gösterilen biçimde seçilmiştir:

$$J = \int_0^T \left\{ \gamma + \sum_{i=1}^n |v_i(t)\tau_i(t)| \right\} dt \quad (8)$$

Bu ifadede,  $\{ \}$  içindeki ilk terim masraf fonksiyoneline harcanan zamanın  $\gamma$  oranındaki katkısını; ikinci terim ise her bir eklemden gerek hız kazanma ve gerekse frenleme nedeni ile harcanan enerjinin toplam katkısını göstermektedir.

Bu masraf fonksiyoneli, (2a,b) sayılı diferansiyel denklemlere, (5) ve (6) sayılı sınır koşullarına ve (7) sayılı kısıtlamaya uyarak minimum yapmak için **Dinamik Programlama** [6] yöntemi kullanılmaktadır. Bunun için aşağıdaki **Minimum Masraf Fonksiyonu**,  $U(\bar{q}, \bar{v}, t)$ , tanımlanır:

$$U(\bar{q}(t), \bar{v}(t), t) = \text{Min} \int_t^T \left\{ \gamma + \sum_{i=1}^n |v_i(s)\tau_i(s)| \right\} ds \quad (9)$$

$$\bar{\tau}(s) \quad t \leq s \leq T$$

Bu fonksiyon, dinamik programlama yönteminin "Optimalite" ilkesine göre, aşağıdaki denklemi sağlar:

$$U(\bar{q}(t), \bar{v}(t), t) = \text{Min} [U(\bar{q}(t+dt), \bar{v}(t+dt), t+dt) + \left\{ \gamma + \sum_{i=1}^n |v_i(t)\tau_i(t)| \right\} dt] \quad (10)$$

Bu denklem, U fonksiyonunun argümanlarına göre birinci kısmı türevlerinin olduğu varsayılarak şöyle de yazılabilir:

$$\text{Min}_{\bar{\tau}} \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial U}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial U}{\partial v_i} \dot{v}_i \right) + \frac{\partial U}{\partial \tau} + \gamma + \sum_{i=1}^n |v_i \tau_i| \right] = 0 \quad (11)$$

(Not: Yukarıda da yapıldığı gibi, bundan sonra fonksiyonların argümanları gerek duyulmadıkça gösterilmeyecektir.)

(2a,b) sayılı vektörel denklemlerin bileşenlerine göre yazılmış biçimleri kullanılırsa, (11) sayılı denklem şu şekli alır:

$$\text{Min}_{\bar{\tau}} \left[ \gamma + \frac{\partial U}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^n (|v_i \tau_i| + \frac{\partial U}{\partial q_i} v_i + \frac{\partial U}{\partial v_i} f_i + \sum_{j=1}^n \frac{\partial U}{\partial v_j} N_{ij} \tau_j) \right] = 0$$

U'nun  $\bar{\tau}$ 'ya bağlı olmadığı ve  $\tau_i = |\tau_i| \text{sgn}(\tau_i)$  olduğu göz önüne alınırsa, yukarıdaki denklem şu şekilde yazılabilir:

$$\gamma + \frac{\partial U}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial U}{\partial q_i} v_i + \frac{\partial U}{\partial v_i} f_i \right) + \sum_{i=1}^n \left[ \text{Min}_{\tau_i} \{ |v_i| + b_i \text{sgn}(\tau_i) \} |\tau_i| \right] = 0 \quad (12)$$

Yukarıda kullanılmış olan  $b_i$  ve "İşaret Fonksiyonu" olarak anılan  $\text{sgn}(x)$ 'in tanımları şöyledir:

$$b_i = \sum_{j=1}^n N_{ji} \frac{\partial U}{\partial v_j} \quad (13)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \text{ ise;} \\ 0, & x = 0 \text{ ise;} \\ -1, & x < 0 \text{ ise.} \end{cases} \quad (14)$$

(12) sayılı denklemdeki minimizasyonun (7) sayılı kısıtlamaya bağlı olarak yapılmasında

$$h_i = \{ |v_i| + |b_i| \text{sgn}(b_i) \text{sgn}(\tau_i) \} |\tau_i| \quad (15)$$

tanımı yararlı olacaktır. Bu tanımla, minimizasyon problemi şu şekli alır:

$$h_i^* = \text{Min}_{\tau_i} h_i; \quad |\tau_i| \leq T_i$$

$h_i$  fonksiyonunun  $v_i$  ve  $b_i$ 'nin değişik değerleri için  $\tau_i$ 'ye göre değişimi, Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu şekle göre, yukarıdaki minimizasyon probleminin

çözümü olarak  $h_i^*$  ve  $\tau_i$  için elde edilen ifadeler şöyledir:

$$|b_i| < |v_i| \text{ ise;}$$

$$h_i^* = 0,$$

$$\tau_i = 0.$$

$$|b_i| = |v_i| \text{ ise;}$$

$$h_i^* = 0,$$

$$0 \leq \tau_i \leq T_i \quad (b_i < 0 \text{ ise}),$$

$$-T_i \leq \tau_i \leq 0 \quad (b_i > 0 \text{ ise}).$$

$$|b_i| > |v_i| \text{ ise;}$$

$$h_i^* = -T_i (|b_i| - |v_i|),$$

$$\tau_i = -T_i \text{sgn}(b_i).$$

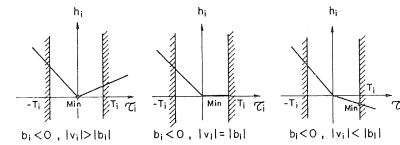
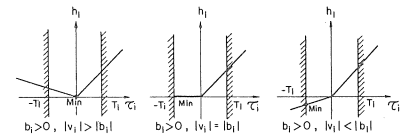
Yukarıdaki çözüm daha derleşik olarak şöyle de ifade edilebilir:

$$h_i^* = -T_i (|b_i| - |v_i|) \text{stp}(|b_i| - |v_i|). \quad (16)$$

$$\tau_i = -T_i \text{sgn}(b_i) \text{stp}(|b_i| - |v_i|). \quad (17)$$

Burada kullanılan ve "Basamak Fonksiyonu" olarak anılan  $\text{stp}(x)$ 'in tanımı şöyledir:

$$\begin{aligned} x < 0 & \text{ ise, } \text{stp}(x) = 0; \\ x = 0 & \text{ ise, } 0 \leq \text{stp}(x) \leq 1; \\ x > 0 & \text{ ise, } \text{stp}(x) = 1. \end{aligned} \quad (18)$$



Şekil 1  $h_i$  fonksiyonunun minimizasyonu

Yukarıda da görüldüğü gibi, minimizasyonu sağlamak üzere  $\tau_i$ ,  $|b_i| \neq |v_i|$  iken tek ve belli bir değer aldığı halde,  $|b_i| = |v_i|$  olduğu zaman  $0 < \tau_i < T_i$  biçiminde bir belirsizlik içine düşmektedir. Ancak, bu durum uygulamada bir sorun yaratmaz; çünkü  $b_i$  ve  $v_i$  birbirlerinden farklı fonksiyonlar oldukları için bir zaman süresi boyunca değil, yalnızca birbirinden ayrık belli anlarda eşit olabilirler. Bu belli anlar, "Dönüşüm Zamanları (Switching Times)" olarak adlandırılırlar ve bu anlarda  $|\tau_i|$ , 0'dan  $T_i$ 'ye veya  $T_i$ 'den 0'a arada herhangi bir değer almaya fırsat bulamadan sıçrayarak dönüşür.

Öte yandan  $b_i$ , (13) sayılı tanımla Minimum Masraf Fonksiyonu olan  $U$ 'ya  $\partial U / \partial v_i$  kısmi türevleri aracılığı ile bağlıdır. Dolayısı ile, Dönüşüm Zamanlarının belirlenebilmesi için her şeyden önce  $\partial U / \partial v_i$  türevlerinin bulunması gerekmektedir. Bu amaçla, (16) ve (17) sayılı denklemlerle ifade edilen minimizasyon sonuçları kullanılarak (12) sayılı denklem şu şekilde yazılır:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial U}{\partial q_i} v_i + \frac{\partial U}{\partial v_i} f_i - T_i (|b_i| - |v_i|) \text{stp}(|b_i| - |v_i|) \right] + \gamma = 0 \quad (19)$$

Bu kısmi diferansiyel denklemi Hamilton Teorisini kullanarak çözmek üzere aşağıdaki tanımlar yapılır:

$$\lambda_i = \partial U / \partial q_i \quad (20)$$

$$\mu_i = \partial U / \partial v_i \quad (21)$$

$$H = \gamma + \sum_{i=1}^n [\lambda_i v_i + \mu_i f_i - T_i (|b_i| - |v_i|) \text{stp}(|b_i| - |v_i|)] \quad (22)$$

Bu arada, (21) sayılı tanımla,  $b_i$  şu şekli alır:

$$b_i = \sum_{j=1}^n N_{ji} \mu_j \quad (23)$$

(22) sayılı denklemle tanımlanan  $H$ , "Hamilton Fonksiyonu" olarak anılır ve Hamilton Teorisine göre bu fonksiyon kullanılarak aşağıdaki diferansiyel denklemler elde edilir:

$$\dot{q}_i = \partial H / \partial \lambda_i$$

$$\dot{v}_i = \partial H / \partial \mu_i$$

$$\dot{\lambda}_i = -\partial H / \partial q_i$$

$$\dot{\mu}_i = -\partial H / \partial v_i$$

Bu denklemlerin

$$d|x|/dx = \text{sgn}(x)$$

olduğu göz önüne alınarak açık yazılmış şekilleri şöyledir:

$$\dot{q}_i = v_i, \quad (24)$$

$$\dot{v}_i = f_i - \sum_{j=1}^n N_{ij} T_j \text{sgn}(b_j) \text{stp}(|b_j| - |v_j|); \quad (25)$$

$$\dot{\lambda}_i = - \sum_{j=1}^n [F_{ji} \mu_j - B_{ji} T_j \text{sgn}(b_j) \text{stp}(|b_j| - |v_j|)], \quad (26)$$

$$\dot{\mu}_i = -\lambda_i - \sum_{j=1}^n G_{ji} \mu_j - T_i \text{sgn}(v_i) \text{stp}(|b_i| - |v_i|) \quad (27)$$

Burada şu tanımlar kullanılmıştır:

$$B_{ji} = \partial b_j / \partial \theta_i, \quad (28)$$

$$F_{ji} = \partial f_j / \partial \theta_i, \quad (29)$$

$$G_{ji} = \partial f_j / \partial v_i. \quad (30)$$

Yukarıdaki diferansiyel denklemlerin çözümü için gerekli olan sınır koşulları ise,  $t=0$  ve  $t=T$  için daha önce (5) ve (6) sayılı denklemlerle

$$q_i(0) = q_i^0, \quad v_i(0) = v_i^0; \quad (31)$$

$$q_i(T) = q_i^*, \quad v_i(T) = v_i^*; \quad (32)$$

şeklinde belirtilmişti. Ancak burada  $T$  önceden verilmiş olan bir zaman değildir ve bu nedenle, optimal kontrol teorisine göre, yukarıdaki sınır koşullarına ek olarak aşağıdaki koşulun da sağlanması gerekir:

$$H \Big|_{t=T} = 0. \quad (33)$$

(24)-(27) sayılı bağlaşıklık diferansiyel denklemlerin (31)-(33) sayılı koşulları sağlayacak biçimde çözülmesi ile  $T$  ve  $[0, T]$  zaman aralığında  $q_i$ ,  $v_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $\mu_i$  değişkenleri;  $i=1, 2, \dots, n$  için zamanın fonksiyonları olarak bulunurlar. Böylece, (23) sayılı denklemle  $b_i$  ve  $|b_i| = |v_i|$  eşitliği ile de Dönüşüm Zamanları belirlenir.

Ancak, söz konusu diferansiyel denklemleri iki değişik zamanda verilen (31) ve (32) sayılı sınır

koşullarını sağlayacak biçimde çözmek, büyük sayıda iterasyon gerektireceği için oldukça zordur. Üstelik bu şekilde elde edilecek bir çözümde esneklik de olmayacaktır. Diğer bir deyişle, ilk konumda meydana gelebilecek değişiklikler çözümü kullanılmaz hale getirecek ve bu durumda aynı zorlukla yeni bir çözüm elde edilmesi gerekecektir.

Dolayısı ile, bu tür optimal kontrol problemlerinde, çözümü kolaylaştırmak ve esnekleştirmek için genellikle kullanılan yöntem,  $q_i$  ve  $v_i$  için verilen başlangıç değerleri yerine  $\lambda_i$  ve  $\mu_i$  için bitiş değerlerinin parametrik olarak verildiğini varsaymak ve gerçek zaman  $t$  yerine,

$$s = T - t \quad (34)$$

biçimde tanımlanan "kalan zaman" kavramını kullanarak (24)-(27) sayılı diferansiyel denklemleri son konumdan geriye doğru (yani,  $s > 0$  için) aşağıda topluca gösterilen bitiş ( $s$ 'ye göre başlangıç) koşullarına göre çözmektir:

$$q_i \Big|_{s=0} = q_i^* , \quad v_i \Big|_{s=0} = v_i^* ; \quad (35)$$

$$\lambda_i \Big|_{s=0} = \lambda_i^* , \quad \mu_i \Big|_{s=0} = \mu_i^* ; \quad (36)$$

$$-H \Big|_{s=0} = 0 . \quad (37)$$

Çözüm uygun bir sayısal yöntemle şu şekilde elde edilir [5]:

$$\bar{q} = \bar{q}(\bar{q}^*, \bar{v}^*, \bar{p}, s), \quad \bar{v} = \bar{v}(\bar{q}^*, \bar{v}^*, \bar{p}, s) ; \quad (38)$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}(\bar{q}^*, \bar{v}^*, \bar{p}, s), \quad \bar{\mu} = \bar{\mu}(\bar{q}^*, \bar{v}^*, \bar{p}, s) ; \quad (39)$$

Burada  $\bar{p}$ ,  $\lambda_i^*$  ve  $\mu_i^*$  parametrelerinden oluşan  $(2n-1)$  boyutlu bir vektördür. Bu vektörün  $(2n-1)$  boyutlu olmasının nedeni,  $\lambda_i^*$  ve  $\mu_i^*$  parametrelerinden uygun görülen bir tanesinin (37) sayılı denklem kullanılarak diğerleri cinsinden ifade edilebilmesidir.

Yukarıdaki çözümü elde etmek üzere önce (37) sayılı denklemi sağlayan bir  $\bar{p}$  vektörü seçilir; daha sonra,  $s$  için yeterince yakın ayrıık değerler kullanılarak  $\bar{q}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\mu}$  vektörleri ve bunlara bağlı olarak (23) sayılı tanıma göre  $\bar{b} = \bar{N}^t \bar{\mu}$  vektörü hesaplanır. Bu işlem  $s$ 'nin artan değerleri için devam ederken  $v_i$  ile  $b_i$  sürekli olarak denetlenirler ve

$$|v_i| = |b_i| \quad (40a)$$

eşitliğinin k'yinci görülüşünde bunu sağlayan  $s$  değeri, "Komplimenter Dönüşüm Zamanı"

$$s_{ki} = s_{ki}(\bar{q}^*, \bar{v}^*, \bar{p}) \quad (40b)$$

olarak saptanır.

Öte yandan,  $s$ 'nin herhangi bir değeri bitiş zamanı ( $T$ ) olarak yorumlanacak olursa;  $s$ 'nin bu değerine karşılık gelen  $\bar{q}$  ile  $\bar{v}$  de başlangıç vektörleri anlamını kazanırlar. Diğer bir deyişle, (38) sayılı denklem grubu şöyle de yorumlanabilir:

$$\bar{q}^0 = \bar{q}(\bar{q}^*, \bar{v}^*, \bar{p}, T), \quad \bar{v}^0 = \bar{v}(\bar{q}^*, \bar{v}^*, \bar{p}, T) \quad (41)$$

Buna göre  $2n$  başlangıç değeri ( $\bar{q}^0$  ve  $\bar{v}^0$  vektörlerinin bileşenleri),  $2n$  parametre ( $T$  ve  $\bar{p}$  vektörünün  $2n-1$  bileşeni) için seçilen değerlerce belirlenen bir Başlangıç Değerleri Kümesi içine düşerler. Seçilen bir  $T$  için  $(0, T)$  zaman aralığındaki Dönüşüm Zamanları ise şu denkleme göre bulunurlar:

$$t_{ki} = T - s_{ki} \quad (42)$$

$$(i=1,2,\dots,n ; k=1,2,3,\dots)$$

$T$  ve  $\bar{p}$  için seçilen değerlerle Başlangıç Değerleri Kümesi oluşturulduktan sonra yapılacak iş, verilen  $\bar{q}^0$  ve  $\bar{v}^0$  vektörlerine bu küme içindeki en yakın  $2n+1$  elemanı bulup bu vektörlere karşılık gelen bitiş ve dönüşüm zamanlarını interpolasyon yolu ile belirlemektir. İnterpolasyon aşağıda açıklanan biçimde yapılabilir.

1. Verilen başlangıç vektörleri kendilerine en yakın  $2n+1$  hesaplanmış vektörün lineer birleşimi biçiminde şöyle ifade edilir:

$$\begin{aligned} \bar{r}^0 &= \bar{r}(i,j) + c_0[\bar{r}(i,k) - \bar{r}(i,j)] \\ &+ \sum_{m=1}^{2n-1} c_m[\bar{r}(i_m,j) - \bar{r}(i,j)] . \end{aligned} \quad (43)$$

Burada gösterim kolaylığı için, şu tanımlar kullanılmıştır:

$$\bar{r} = \begin{bmatrix} \bar{q} \\ \bar{v} \end{bmatrix}, \quad \bar{r}^0 = \begin{bmatrix} \bar{q}^0 \\ \bar{v}^0 \end{bmatrix}, \quad \bar{r}^* = \begin{bmatrix} \bar{q}^* \\ \bar{v}^* \end{bmatrix};$$

$$\bar{r}(i,j) = \bar{r}(\bar{r}^*, \bar{p}_i, s_j) .$$

Buna göre, Başlangıç Değerleri Kümesi,  $i=1,2,\dots,n_p$  ve  $j=1,2,\dots,n_s$  için hesaplanmış olan  $\bar{r}(i,j)$  vektörlerinden oluşmaktadır. (43) sayılı denklemde ise  $\bar{r}(i,j)$  özel olarak  $\bar{r}^0$  vektörüne en yakın olan vektörü;  $\bar{r}(i,k)$  ve  $m=1,2,\dots,2n-1$  için  $\bar{r}(i_m,j)$  daha az yakın olan diğer  $2n$  vektörü göstermektedir.

2. (43) sayılı lineer denklem çözülerek  $c_0$  ile  $c_1, c_2, \dots, c_{2n-1}$  katsayıları bulunur.

3. Bitiş zamanı,

$$T = s_j + c_0(s_k - s_j) \quad (44)$$

biçiminde belirlenir.

4. Komplimanter Dönüşüm Zamanları, yalnızca  $\bar{p}$  vektörüne bağlı olduklarından  $s_{\beta\alpha}(i) = s_{\beta\alpha}(\bar{r}^*, \bar{p}_i)$  gösterimi ile  $\alpha=1,2,\dots,n$  ve  $\beta=1,2,3,\dots$  için

$$s_{\beta\alpha} = s_{\beta\alpha}(i) + \sum_{m=1}^{2n-1} c_m [s_{\beta\alpha}(i_m) - s_{\beta\alpha}(i)] \quad (45)$$

biçiminde; bunlara karşılık gelen Dönüşüm Zamanları ise (44) ve (45) sayılı denklemler kullanılarak

$$t_{\beta\alpha} = T - s_{\beta\alpha} \quad (46)$$

biçiminde belirlenirler.

5. (17) sayılı denkleme göre; optimal kontrol değişkenleri, Dönüşüm Zamanlarının yanısıra  $b_i$  ve  $v_i$  değişkenlerine de ihtiyaç göstermektedir. Bu değişkenleri elde etmek üzere  $\bar{v}$  ve  $\bar{\mu}$  vektörlerinin ara değerleri şu şekilde bulunur:

$$\bar{v} = \bar{v}(\bar{r}^*, \bar{p}_i, T-t) + \sum_{m=1}^{2n-1} c_m [\bar{v}(\bar{r}^*, \bar{p}_i, T-t) - \bar{v}(\bar{r}^*, \bar{p}_i, T-t)] \quad (47)$$

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}(\bar{r}^*, \bar{p}_i, T-t) + \sum_{m=1}^{2n-1} c_m [\bar{\mu}(\bar{r}^*, \bar{p}_i, T-t) - \bar{\mu}(\bar{r}^*, \bar{p}_i, T-t)] \quad (48)$$

$$\bar{b} = \hat{N}^t \bar{\mu} \quad (49)$$

Aslında;  $\bar{v}$  ile  $\bar{b}$  yukarıdaki biçimde ifade edildikten sonra, dönüşüm zamanları da (4)'deki işlemlere gerek kalmaksızın  $|v_i| = |b_i|$  eşitlikleri ile bulunabilirler. Öte yandan;  $\tau_i$  değişkeninin dönüşüm zamanları arasında  $T_i, 0, -T_i$  değerlerinden hangisini alacağı, en yakın çözüm olan  $\bar{r}(\bar{r}^*, \bar{p}_i, T-t)$  fonksiyonuna bakılarak da kestirilebilir. Bu durumda da, optimal kontrolü uygulayabilmek için (5)'deki işlemlere gerek kalmaz. Ancak, hem (4) hem de (5)'deki işlemlerin yapılması sonuçların denetimi açısından yarar sağlar.

### ÖRNEK

Önceki kısımda açıklanan optimizasyon yöntemi- ni uygulamak üzere Şekil 2'de gösterilen üç uzuvlu robot kol örnek olarak ele alınmıştır.

Şekil 2'deki robot kolun uzuvlarının birbirine eşit ve yapılarının düzgün olduğu varsayılmıştır. Her bir uzvun uzunluğu  $L=0.5$  m, kütlesi  $m=0.5$  kg, uzunluğuna eylemsizlik momenti  $J_1 = 0.0007$   $\text{kgm}^2$ , enine eylemsizlik momenti ise  $J_2 = 0.00812$   $\text{kgm}^2$ 'dir. Açısal eklem değişkenleri  $q_i$  yerine  $\theta_i$  ile gösterilmiştir. Örneği basitleştirmek amacı ile eklem

motorlarının ağırlıksız oldukları ve üçüncü uzvun herhangi bir yük taşımadığı varsayılmıştır. Ayrıca, eklem motorlarının uygulayabilecekleri momentlerin  $\pm 20$  N.m ile kısıtlanmış oldukları kabul edilmiştir.

Optimizasyon, P noktasını (üçüncü uzvun uç noktasını) herhangi bir ilk konumdan ( $x_1 = 1.0$  m,  $x_2 = 0.0$  m,  $x_3 = 0.5$  m) noktasına hızı sıfır olacak biçimde iletmek amacı ile yapılacaktır. Buna göre, son konumda eklem değişkenlerinin ve türevlerinin ( $\omega_i = \dot{\theta}_i$ ) değerleri şöyle olmaktadır:

$$\theta_1^* = 0^\circ, \quad \theta_2^* = 90^\circ, \quad \theta_3^* = -90^\circ; \quad (50a)$$

$$\omega_1^* = \omega_2^* = \omega_3^* = 0 \text{ rad/s.} \quad (50b)$$

Optimizasyon için kullanılan performans ölçüsünde bitiş zamanının ağırlığı  $\gamma = 10$  olarak alınmıştır.

Son konumda hız sıfır olduğundan bu örnek için (33) sayılı koşul şu şekli alır:

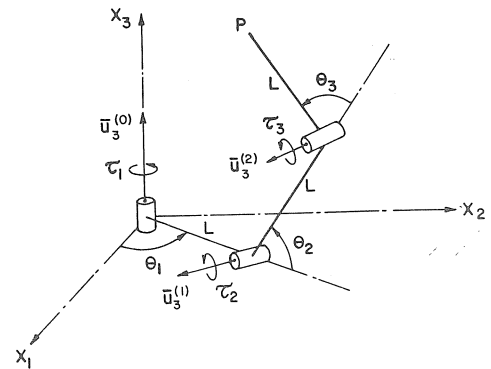
$$H \Big|_{t=T} = \gamma + \sum_{i=1}^3 (\mu_i^* f_i^* - T_i |b_i^*|) = 0.$$

$b_i$  ile  $\mu_i$  arasındaki (23) sayılı ilişki kullanılarak yukarıdaki denklem şöyle de yazılabilir:

$$\sum_{i=1}^3 T_i \left| \sum_{j=1}^3 N_{ji}^* \mu_j^* \right| = \gamma + \sum_{i=1}^3 f_i^* \mu_i^* \quad (51)$$

Bu denklemlerde  $( )^*$ , ilgili fonksiyonun  $t=T$  ya da  $s = 0$  iken aldığı değeri göstermektedir. Görüldüğü gibi, (51) sayılı denklem  $\lambda_i^*$  parametrelerini serbest bırakırken  $\mu_i^*$  parametrelerinden birini diğer ikisine bağlamaktadır. Buna göre, bağımlı parametre  $\mu_i^*$  olarak seçilirse, parametre vektörü  $\bar{p}$  şu şekilde oluşur:

$$\bar{p} = [\lambda_1^* \quad \lambda_2^* \quad \lambda_3^* \quad \mu_2^* \quad \mu_3^*]^t \quad (52)$$



Şekil 2 Örnek'teki üç uzuvlu robot kol

Tipik bir sayısal örnek elde etmek üzere,

$$\bar{p} = [-10.0 \quad 0.0 \quad 5.0 \quad 2.5 \quad 2.5]^t$$

parametre vektörü seçilecek olursa; (51) sayılı denklem  $\mu_1^* = 0.055$  değerini verir.

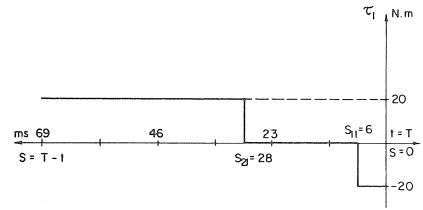
Bu parametre değerleri ile (50a,b) sayılı denklemlerle verilen bitiş değerleri kullanılarak bu robot kol için yazılan (24)-(27) sayılı dinamik denklemlerin  $s > 0$  için uygun bir sayısal yöntemle [5] geriye doğru integre edilmeleri ile, Şekil 3 ve 4'te gösterilen kontrol momenti değişimleri ile Şekil 5 ve 6'da gösterilen eklemler açısı değişimleri elde edilmiştir. Bu şekillerdeki grafikler,  $0 < s < 0.07$  saniye için 0.001 saniyelik zaman adımları ile IBM 370/145 üzerinde 1.45 dakika zaman harcanarak oluşturulmuşlardır. İntegrasyon için 4. mertebeden Runge-Kutta yöntemi ile başlatılan Hammings'e ait 4. mertebeden Kestirme-Düzeltilme yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3 ve 4'te kontrol momentlerine ait [0,0.07] saniyelik zaman aralığında yer alan dönüşüm zamanları da görülmektedir. Ancak, bu çözüm bir tek  $\bar{p}$  vektörü için elde edildiği için geçerli olabileceği başlangıç değerleri son derece kısıtlıdır. Yalnızca, Şekil 5 ve 6'daki eğrileri sağlayan  $\theta_1^0$  ve  $\omega_1^0$  değerleri, başlangıç değeri olabilirler. Fakat, değişik  $\bar{p}$  vektörleri için, biraz daha uzun bir integrasyon zamanı (örneğin, 1 saniye) kullanılarak elde edilecek çözümlerle başlangıç değerleri kümesini yeterince zenginleştirmek mümkündür.

#### OPTIMAL CONTROL OF ROBOTIC MANIPULATORS FOR MINIMUM TIME AND ENERGY

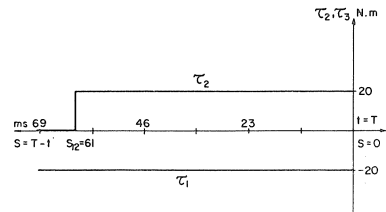
The problem considered in this paper is about driving a manipulator with  $n$  degrees of freedom in an optimal fashion between two positions. Optimization is achieved by minimizing a cost functional which penalizes both the time and the energy required to complete the motion. It is assumed that each driving force or moment is bounded in magnitude. The optimal control so obtained necessitates the application of each driving force or moment in the form of three position (-max, 0, +max) control. The switching times at which a driving force or moment shifts from one of such three values to the next are determined by equating the rates of joint variables to special functions obtained as the outcome of the solution. Using the method of dynamic programming, it has been convenient to obtain the optimal solution for a parametrically determined set of initial conditions. The solution corresponding to a specified initial condition within this set is then determined by means of linear interpolation. As an example, the optimization method developed here is applied to a three-link spatial manipulator.

#### KAYNAKÇA

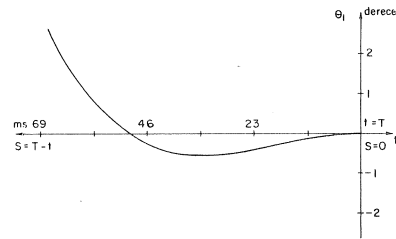
- 1 Paul, R.P.C., Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, The MIT Press, Boston, 1982.
- 2 Brady, M. ve Diğerleri, Robot Motion: Planning and Control, The MIT Press, Boston, 1982.



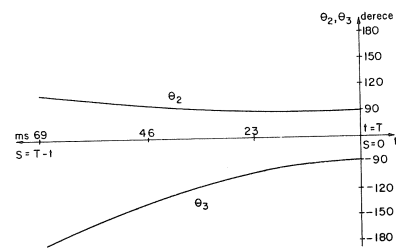
Şekil 3  $\tau_1$  kontrol momentinin değişimi ve dönüşüm zamanları



Şekil 4  $\tau_2$  ve  $\tau_3$  kontrol momentlerinin değişimi ve dönüşüm zamanları



Şekil 5  $\theta_1$  açısının değişimi



Şekil 6  $\theta_2$  ve  $\theta_3$  açılarının değişimi

- 3 Koth, B., Kahn, M.E., "The Near-Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains", J. Dynamic Systems, Measurements, and Control, (1971) 93, 164-172.
- 4 Vukobratovic, M., Cvetkovic, V., "Contribution to Controlling Non-Redundant Manipulators", J. Mechanism and Machine Theory, (1981) 16, 81-91.
- 5 Tosunoğlu, L.S., A Study on Power-Time Optimal Control of Manipulators, Y.Lisans Tezi, Makina Müh. Böl., ODTÜ, 1981.
- 6 Bellman, R., Dreyfus, S.E., Applied Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, 1962.

# Elektro Erozyon ile İşleme (EDM) için Yüksek Hızlı Vurum Tanımlayıcı Tasarımı

Can ÇOĞUN

Öğretim Görevlisi,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Ankara

Abdülkadir ERDEN

Doç.Dr.,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Ankara

Elektro erozyon ile işlemede vurum zincirlerinin karakteristiklerinin incelenmesi için yüksek hızlı bir vurum tanımlayıcısı tasarlanmış, imal edilmiş, denenmiş ve başarıyla uygulanmıştır. Burada vurum tanımlama sisteminin çalışma prensipleri ve diğer denetim bloklarıyla ilişkisi verilmiştir. Tanımlayıcıdan elde edilen ve bilgisayarda depolanan vurum bilgileri elektro erozyon ile işleminin bilgisayar yardımı ile denetiminde ve işleme performansının iyileştirilmesinde kullanılacaktır.

## GİRİŞ

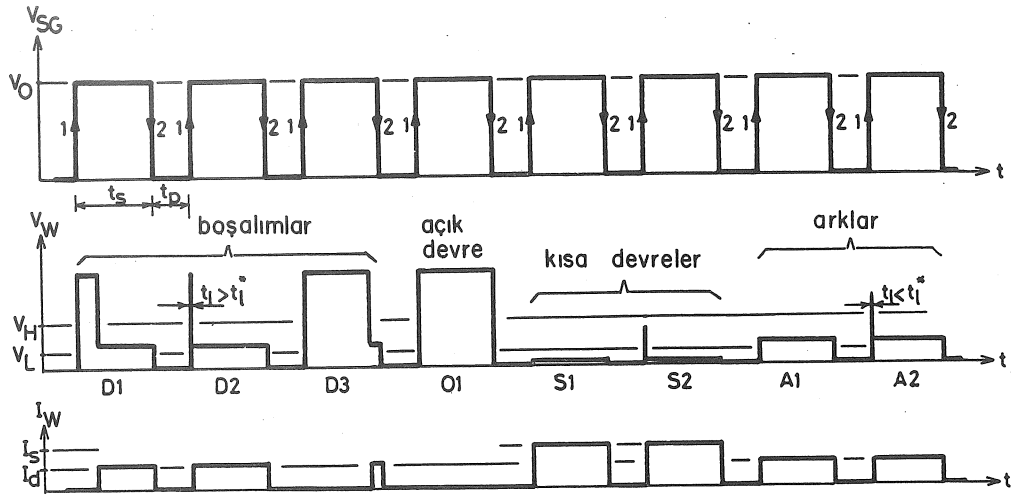
Elektro erozyon ile işleme esnasında, işleme performansı hakkında fikir sahibi olabilmek konunun halen kesin çözüm getirilememiş teknolojik sorunlarından birisidir. İşleme aralığının küçüklüğü (10-200  $\mu\text{m}$ ) ve işlemede kullanılan vurumların kısa süreli (10-150  $\mu\text{s}$ ) oluşu, fiziksel gözlem yöntemlerini güçleştirmektedir. Elektro erozyon ile işleminin bilgisayar yardımı ile denetimi ve giderek tam bilgisayar denetimli tezgahlar geliştirilmesi ise işleme sırasında işleme performansının belirlenmesini gerektirmektedir. Bugüne kadar çeşitli kuruluşlarca yapılan birçok araştırmada, çeşitli parametrelerin etkileri incelenmiş ve buradan işleme performansı konusunda bir ölçüt geliştirilmeye çalışılmıştır. İşleme performansının saptanması ve işlemin denetiminin sağlanabilmesi için bazı çalışmalarda işleme esnasında yayılan radyo sinyalleri kullanılmıştır [1-4]. Çalışmaların çoğunda işleme esnasında kaydedilen vurum zincirleri performansa esas alınmıştır. Bu çalışmaların bazıları boşalım gerilimini [5,6], bazıları boşalımların gecikme sürelerini [7-11], bir kısmı ise boşalım akım dalga biçimlerini [12] sistem performansına esas olarak kabul etmiştir. Başka bir çalışmada ise boşalımların sayısı ile ortalama boşalım gerilimi performans göstergesi olarak kullanılmıştır [13]. Bu değişik yaklaşımlar içinde vurum zincirleri özelliklerinin ana ölçüt olarak alındığı çalışmalar, endüstriyel uygulamalar için daha uygun görülmektedir. Vurum zincirlerinin özelliklerinin belirlenmesi ise, vurumların karakteristik özelliklerinin en iyi şekilde belirlenmesi ve bilgisayar tarafından algılanmasını sağla-

yacak yaklaşımların geliştirilmesi ile mümkündür. Bu nedenle, öncelikle vurum özelliklerinin incelenmesi ve vurumların algılanabilir şekilde sınıflandırılması zorunludur.

## ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE VURUM ÖZELLİKLERİ VE SINIFLANDIRMA

EDM için vurumların tanımlanması ve sınıflandırılması, uluslararası bir komite tarafından daha önce yapılmıştır [14]. Buna göre başlıca dört tür vurum belirlenmiştir; normal boşalımlar, arklar, açık devre vurumlar ve kısa devre vurumlar. Bunlardan başka ikinci derecede önemli vurum türleri belirlenmişse de, EDM'nin denetimi için önemli olmadıkları saptanmıştır [15]. Vurum özelliklerinin ve türlerinin belirlenmesi için Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda elde edilen çeşitli vurum türlerinin osiloskop kayıtları Şekil 1'de görülmektedir. Bu şekilde verilen D1, D2 ve D3 tipik boşalım vurumlarıdır. D1 normal gecikme süreli bir boşalım, D2 çok kısa gecikme süreli (gerilim sıçraması) bir boşalım, D3 ise, uzun gecikme süreli bir boşalım göstermektedir. CIRP STC-E [14] raporunda kabul edildiği şekilde 200 ns'den kısa gecikme süreli vurumlar ark olarak kabul edilmiştir (Şekilde A2 tipi olarak gösterilmektedir.). O1 tipik bir açık devre vurumu, S1 ve S2 ise, kısa devre vurumları göstermektedir. S2'de vurum başlangıcında gerilim sıçraması görülmektedir. Kısa devre gerilimi 0.5 ile 2.3 V arasında





Şekil 1 Vurum üretici (SG) ve elektrotlar arası sinyallerin gerilim ve akım dalga biçimleri

ölçülmüştür. Kısa devre akım değeri 15 Amp. ile vurum üretici tarafından sınırlandırılmıştır. A1 ve A2 ise tipik ark vurumlarıdır. İdeal olarak ark tipi vurumlarda gecikme süresi yok kabul edilir.

Şekil 1'de verilen osiloskop kayıtları ile, 4 temel vurum türünü ayırtmak mümkündür. Bu vurum şekillerini elektronik olarak belirlemek ve sınıflamak amacıyla bugüne kadar, ODTÜ'de çeşitli çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalarla ilgili sonuçlar yayınlanmıştır [16-20]. Bu çalışmalarda prototip sistemler geliştirilerek EDM tezgahları üzerinde denenmiş ve çeşitli koşullarda deneysel veriler toplanarak analiz edilmiştir. Bilgisayar teknolojisindeki son gelişmelerin sağladığı olanaklardan da yararlanarak, geliştirilen prototip sistemler, her tür EDM tezgahına uyarlanabilir bir sistem haline getirilmiştir. Böylece tam bilgisayar kontrollü bir EDM tezgahı için gerekli olan bir vurum tanımlayıcı (EDM Pulse Discriminator) geliştirilerek uygulamaya konulmuş bulunmaktadır.

Kurulan mantık devresi ile, vurumlar iki eşik gerilimine (alçak gerilim  $V_L$  ve yüksek gerilim  $V_H$ ) ve minimum gecikme süresine ( $t_1^*$ ) göre sınıflandırılmıştır. Vurum başlangıcından minimum gecikme süresi (200 ns) geçtikten sonra, elektrotlar arası gerilim ( $V_W$ ), alçak ve yüksek gerilimlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada sırası ile,  $V_L$  ve  $V_H$ , 4V ve 17V olarak alınmıştır. Bu değerler, tipik EDM vurumlarında yine tipik gerilim düzeyleri gözlenerek belirlenmiştir. Şekil 1'de, sinyal üreticinin ürettiği sinyallerde ( $V_{SG}$ ) 1 ve 2 numaralı düşey gerilim çizgileri, sırası ile yükselen ve düşen gerilim kayıtlarıdır. Mantık devresinde, vurum üreticinin ürettiği her vurumun yükselen ve düşen kenarlarında (1 ve 2) aşağıdaki koşullara göre iki sinyal üretilir:

$$V_W > V_H \quad \text{veya} \quad V_W < V_L$$

Tezgah vurum üreticiden, gelen vurum sinyalleri ( $V_{SG}$ ) ile birlikte bu sinyaller beraberce değerlendirildiğinde, daha önce bahsedilen 4 tür vurum saptanabilmektedir. Vurumların 4 tür olarak tanımlanmasında Çizelge 1'de özetlenen algoritma kullanılmıştır.

Çizelge 1 Vurumları tanımlama algoritması

Yükselen SG sinyali (1) tarafından	Düşen SG sinyali (2) tarafından	Vurum Türü
$V_W > V_L$	$V_W > V_L$	Boşalım vurumlar (D1, D2 ve D3)
$V_W > V_H$	$V_W < V_H$	Ark vurumlar (A1)*
$V_W > V_L$	$V_W > V_L$	Açık devre vurumlar (O1)
$V_W < V_H$	$V_W < V_H$	Kısa devre vurumlar (S1)*
$V_W > V_L$	$V_W > V_L$	
$V_W > V_H$	$V_W > V_H$	
$V_W < V_L$	$V_W < V_L$	
$V_W < V_L$	$V_W < V_H$	

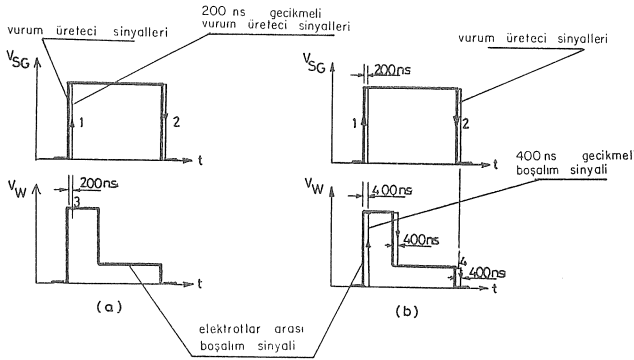
\* Algılama devresi, vurumların gerilim sinyalleri ( $V_W$ ) ile iki eşik seviyesini ( $V_L$  ve  $V_H$ ) gerçek zamandan 200 ns daha gecikmeli olarak karşılaştırıldığından, A2 ve S2 tipi gerilim sıçramalı ark ve kısa devre vurumlarını A1 ve S1 tiplerinde olduğu gibi algılamaktadır.

İşleme sırasında kaydedilen vurumların % 99'dan fazlası bu algoritma içine girmiştir. Geri kalan çok az sayıda vurum ise, çalışmanın bütünlüğünü bozmayacağı için göz önüne alınmamıştır.

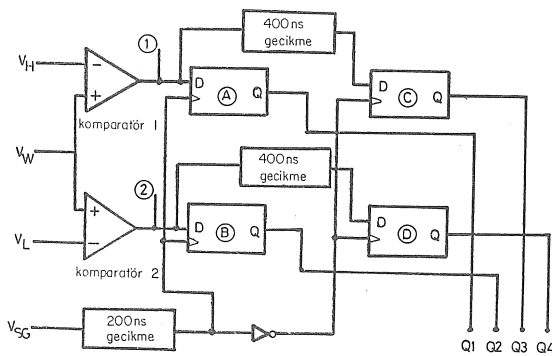
Yukarıda verilen algoritma uygulanırken, vurum üretici sinyallerine ( $V_{SG}$ ) 200 ns'lik bir gecikme verilmiştir (Şekil 2a). Böylece 200 ns'den daha az gecikmeli boşalmalar, ark olarak algılanmıştır. Benzer şekilde, elektrotlar arası vuruma, düşen gerilim tarafından da 400 ns'lik bir gecikme verilmiştir. Böylece ilk gerilim değeri, vurum başlangıcından 200 ns sonra, ikinci değer ise, vurumun bitiminden 200 ns önce alınmıştır. Bu noktalar Şekil 2'de grafik üzerinde 3 ve 4 olarak gösterilmiştir.

### MANTIK DEVRESİ TASARIMI

Çizelge 1'de verilen algoritmayı uygulamak için özel bir mantık devresi geliştirilmiştir. Şekil 3'te bu devrenin şeması verilmiştir. Devre içindeki 1 ve 2 numaralı komparatörler,  $V_H$  ve  $V_L$  değerlerini  $V_W$  ile karşılaştırmaktadır. Böylece oluşan elektronik mantık sinyalleri (1 ve 0), vurum üretici sinyalinin ( $V_{SG}$ ) yükselen kenarında A ve B, düşen kenarında C ve D anahtarlarını tetiklemektedir. Sonuçta, Q1, Q2, Q3 ve Q4 anahtarlarında, Çizelge 2'deki gerilim karşılaştırmalarını yansıtan mantık sinyalleri oluşmaktadır. Böylece Q1-4 anahtarlarında vurum ile ilgili bilgiler oluşmaktadır. Bu bilgileri, 1 ve 0 olarak alırsak Çizelge 3'de verilen mantık çizelgesi oluşur.



Şekil 2 Elektrotlar arası sinyallerin tanımlanmasında vurum dalga biçimlerine uygulanan gecikme süreleri



Şekil 3 Vurum tiplerinin tanımlanmasında kullanılan komparatör mantık devresi

Çizelge 2 Gerilim karşılaştırmalarını yansıtan mantık sinyalleri

Anlamı	Mantık Sinyali
$V_W < V_H$	0
$V_W > V_H$	1
$V_W < V_L$	0
$V_W > V_L$	1
$V_W < V_H$	0
$V_W > V_H$	1
$V_W < V_L$	0
$V_W > V_L$	1

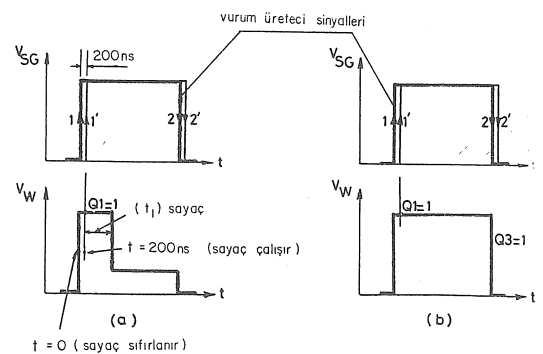
Çizelge 3 Vurum tanımlama için mantık çizelgesi

Q1	Q2	Q3	Q4	Karar
1	1	0	1	Boşalım (D1,D2,D3)
1	1	1	1	Açık devre (O1)
0	0	0	0	Kısa devre (S1, S2)
0	1	0	0	Ark (A1,A2)

1 ve 0'ın diğer kombinasyonları Tanımsız

### SAYAÇ DEVRESİ TASARIMI

Vurumların gecikme sürelerini belirlemek için ayrı bir sayaç devresi tasarımı yapılmıştır. Sayaç, Q1 anahtar sinyali 1 ise çalışmaya başlamakta ve  $V_W < V_H$  olduğunda durmaktadır (Şekil 4a). Q3 anahtar 1 sinyali ile tetiklendiğinde sayaç yine durmaktadır (Şekil 4b). Ancak bu ikinci durumda ( $Q3 = 1$ ), Q1-4 anahtarlarında 1-1-1-1 bilgisi olduğundan, vurum açık devre olarak kabul edilerek, ölçülen gecikme süresi değeri, bilgisayara aktarılmamakta, bunun yerine, açık devre oluşum bilgisi gönderilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, vurum üreticinin ürettiği sinyallerin ( $V_{SG}$ ) yükselen gerilim kenarı sayacı sıfırlamaktadır. Ancak daha önce açıklanan nedenlerle, ölçülen gecikme sürele-



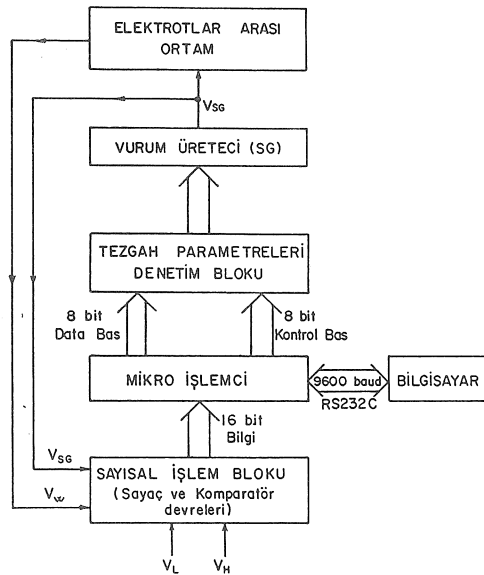
Şekil 4 Elektrotlar arası sinyallerin gecikme sürelerinin ölçülmesi

ri, gerçek gecikme sürelerinden 200 ns daha azdır. Bu durum bilgisayar yazılımı içinde düzeltilmektedir.

Sayaç devresinde önceleri frekansı 4 MHz olan bir kristal osilatör kullanılmıştı. Daha sonra 2 MHz'lik bir osilatör kullanarak öncekinden farksız sonuçlar alınca, bellek kapasitesini küçültebilmek ve bilgi aktarım zamanını kısaltabilmek için 2 MHz'lik kristal osilatör tercih edilmiştir. Q1-4 anahtarlarındaki bilgiler için 4 bit kullanılmış, kalan 12 bit'lik yer ise gecikme sürelerinin depolanmasında kullanılmıştır. 12 haneli en büyük ikili sistem (binary system) sayısı ondalık 4096 sayısına karşı geldiğinden ölçülebilen en yüksek gecikme süresi değeri 2048  $\mu$ s olmaktadır. Bu değer uygulamada görülen değerlerin (20-200  $\mu$ s) çok üstünde olduğundan bir sorun yaratmamaktadır.

## BİLGİ AKTARIMI

Q1-4 anahtarlarında (4 bit) ve sayaçta (gecikme süresi için 12 bit) oluşan bilgi Doğrudan Bellek Girişimi (DMA) ile mikro işlemci kapsamındaki bellek bloklarına (RAM) aktarılmaktadır (Şekil 5). DMA bilgi aktarımına, vurum üreticinin ürettiği sinyallerin ( $V_{SG}$ ) düşen gerilim kenarı ile başlamakta ve vurum ara süresi ( $t_p$ ) içinde bu bilgiyi RAM'a aktarmaktadır. Zaman ve yer kazanmak açısından bilginin RAM'dan alınıp bilgisayara aktarılmasını da mikro işlemci kontrol etmektedir. Bu mikro işlemci, Q1-4 bilgisini değerlendirerek, vurum türünü saptamaktadır. Vurum, bir açık devre vurum ise mikro işlemci bilgisayara ondalık 1 sayısını 1 byte'lık bir blokla göndermektedir. Kısa devre ve ark tipi vurumların belirtilmesi ise ondalık 2 ve 3 sayılarının 1 byte'lık bloklarla ana bilgisayara



Şekil 5 Vurum tanımlama biriminin diğer denetim bloklarıyla bağlantısını gösteren blok şeması

gönderilmesi ile sağlanmaktadır. Boşalım tipi vurumlarda ise önce ondalık 4 sayısı 1 byte'lık bir blokla gönderilmekte daha sonra 12 bit'lik sayaç değerine karşı gelen gecikme süresi ardaşık 1'er byte'lık 4 blokla gönderilmektedir. Gönderilen ilk blok ondalık gecikme süresi değerinin 1000'ler hanesini, son blok ise 1'er hanesini göstermektedir. Ardaşık 2100 vurum için gönderilen bu bilgiler bilgisayarda açılan bir veri matrisi içerisinde depolanmaktadır. Mikro işlemci ile bilgisayar arasında bilgi aktarımı RS232C ile sağlanmaktadır. Aktarım hızı 9600 baud alınmıştır (Şekil 5).

Halen kullanılan bellek (RAM) her biri 16 bitlik 2100 vuruma ait bilgiyi depolamak üzere sınırlandırılmış olmakla beraber 4000 ardaşık vurum bilgisini depolayabilecek kapasitededir.

## VURUM TANIMLAMA YAZILIMLARI

Vurum biçimlerinin tanımlanması tekniğini içeren yazılım mikro işlemci blokunun içerisindeki ROM birimine kaydedilmiştir. Bu yazılım tüm sistem işletimini kontrol eden programın bir parçasıdır. Öz olarak bu yazılım gelen 4 bitlik vurum tipi (Q1-4) bilgisine göre vurumun türünü tanımlar ve 12 bitlik sayaç bilgisine göre gecikme süresini  $\mu$ s bazına çevirir. Bu bilgileri bilgisayarın belleğindeki bir bilgi matrisine yollar. Ardaşık 2100 vurumla ilgili bilgiyi yolladıktan sonra bilgi yollamayı durdurur, matrisi kapatır ve depolanmış bilgileri analiz için bilgisayarın kontrolüne bırakır. Bilgisayar analizi tamamlandıktan sonra program tekrar işlevlerine başlar.

## SONUÇ

Bu çalışmada, elektro erozyon ile işlemenin bilgisayar yardımı ile denetimini sağlamak üzere kurulmuş olan kontrol sisteminin en önemli kısımlarından biri olan "vurum tanımlama" birimi tanımlanmıştır. Vurum tanımlayıcı, gerilim vurum zincirlerinin özelliklerini, mantık ve sayaç devreleri yardımı ile değerlendirerek değişik vurum oluşumlarına karar vermektedir. Daha sonra vurum tipi ve boşalım vurumlarının gecikme süresi bilgileri yardımcı kontrol birimleri tarafından ardaşık olarak bilgisayara gönderilmektedir. Bilgisayar tarafından değerlendirilmeye alınan bu bilgiler, işleme esnasında tezgahın işleme performansının anlaşılmasında ve geliştirilmesinde kullanılmaktadır.

## DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH SPEED PULSE DISCRIMINATOR FOR ELECTRIC DISCHARGE MACHINING

A high speed pulse discrimination circuit is designed, constructed and applied successfully to investigate characteristics of pulse trains in Electro Discharge Machining (EDM). In this paper the operation principles of the discrimination circuit and its connection with the other control units are given. Information obtained from discrimination unit is stored in a computer and used for adaptive on-line control of Electric Discharge Machining.

## KAYNAKÇA

- 1 Bhattacharyya, S.K. ve El-Menshaw, M.F., "Identification of Discharge Profile in EDM", **Sixth North American Metalworking Research Conference**, University of Florida, 16-17 Nisan 1978.
- 2 Bhattacharyya, S.K. ve El-Menshaw, M.F., "Monitoring and Controlling the EDM Process", **ASME Journal of Engineering for Industry**, 102, (1980), 2, 301-305.
- 3 Motoki, M. ve Ono, T., "Bridge Phenomenon in the Gap, Instability of the Low Current Discharge and High Frequency Oscillation", **6th International Symposium, for Electromachining (ISEM 6)**, Wolfsberg, İsviçre, 21-24 Haziran 1977.
- 4 Fluckiger, H., "Monitron, a New EDM Interactive Control System", **SME Technical Paper**, MS73-199, (1973).
- 5 Ateliers des Charmilles S.A., "Method and Aparatus for Positioning and Electrode-Tool Relative to a Workpiece in EDM", **American Patent No.3**, 860,779, 14 Ocak 1975.
- 6 Cooke, R.F. ve Crookall, J.R., "An Investigation of Some Statistical Aspect of EDM", **Int. J. of Machine Tool Design and Research**, 13, (1973), 5, 63-68.
- 7 Heuvelman, C.J., Horsten, H.J.A. ve Veenstra, P.C., "An Introductory Investigation of the Breakdown Mechanism in Electro-Discharge Machining", **Annals of the CIRP**, 20, (1971), 1, 13-20.
- 8 Enning, H.J. ve Koning, W., "Einfluss Der Schnellen Prozessabhängigen Einstellung Der Pausen dauer Auf Das Arbeitsergebnis Beim Funkenerosiven Senken", **Industrie Anzeiger**, 100, (1979), 93, 38-40.
- 9 Weck, M. ve Peuler, H., "Die Zundverzögerungszeit als Beurteilungs Kriterium bei der Funkenerosiven Senken Bearbeitung", **Industrie Anzeiger**, 101, (1979), 64,312-318.
- 10 Enning, H.J., "Verschleissminderung durch Adaptive", **Industrie Anzeiger**, 101, (1979), 55, 43-46.
- 11 Weck, M., Koning, W. ve Peuler, H., "Automatic Control and Supervision of the EDM-Process", **ISEM7**, Birmingham, 1983.
- 12 Endel, A. ve Diveky, P., "Concept and the Solution of Control Systems For EDM Machines", **ISEM7**, Birmingham, 1983.
- 13 Koning, W. ve Kurr, R., "Fundamentals and an Operative System of Adaptive Control in Electro Discharge Machining", **Technical Paper**, Tech. Univ., Aachen, 1982.
- 14 CIRP Scientific Technical Committee E., "Summary Specifications of Pulse Analysers for Spark Erosion Machining", **Teknik Rapor** 01/02/1979, 1979.
- 15 Dauw, D. ve Snoeys, R., "Pulse Discrimination for Real Time EDM Analysis", **ISEM7**, Birmingham, 1983.
- 16 Erden, A., "Investigations on Pulse Trains in EDM", **METU J. Pure and Appl. Sciences**, 15, (1982), 1.
- 17 Çoğun, C., Erden, A. ve Türkvan, H., "Design and Application of a Digital Time-Lag Counter to Investigate Characteristics of Pulse Trains in EDM", **Proc., 24th MTDR Conf.**, Manchester, İngiltere, 1983.
- 18 Çoğun, C., Erden, A., "Effect of Pause Time on Pulse Trains in Electric Discharge Machining", **METU J. Pure and Appl. Sciences**, 17, (1984), 3, 191-208.
- 19 Çoğun, C., Erden, A., "Elektriksel Aşındırma ile İşlemede Vurum Zincirlerinin Özelliklerinin, İstatistiksel Modellenmesi ve incelenmesi", **Doğa Bilim Dergisi, Seri B**, 9, (1985), 2, 149-161.
- 20 Çoğun, C., Erden, A., "Correlation Between Pulse Train Characteristics and Machining Parameters in Electric Discharge Machining", **Int. Symp. on Measurement and Control (MECO 85)**, İstanbul, 23-25 Temmuz 1985.

# Takım Tezgahı Etkinliğinin Saptanmasında Bir Yaklaşım

Macit KARABAY

Y. Doç. .  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Ankara

## GİRİŞ

Takım tezgahlarından, iş parçalarını, istenilen teknik gereksinimlere uygun biçimde üretebilmelerinin yanısıra bunları en ucuza işleyebilmeleri de beklenir. Başka bir deyişle bir iş için tezgah seçilirken teknolojik ve ekonomik üstünlük beraberce aranır. Bu özelliklerine kısaca bir tezgahın teknik ve ekonomik etkinliği adı verilebilir [1].

Bir tezgahın, olabildiğince hızlı üretim yaparken, olabildiğince de az bir gideri olmalı, zaman içinde ürettiği parçalardaki farklılıklar kabul edilebilir sınırlar arasında kalmalıdır.

## ETKİNLİK ETMENİ (E)

Bir tezgah için etkinlik etmeni

$$E = E_{\dot{U}} \cdot E_K \cdot E_G \quad (1)$$

olarak gösterilebilir.

Burada;

$E_{\dot{U}}$  : Üretim hızı etmeni

$E_K$  : Kalite etmeni

$E_G$  : Çalıştırma giderleri etmenidir.

Eğer atelyedeki tezgahların belli işler için etmenleri belirlenmişse, bir iş üretime alınırken hangi tezgahın bu iş için en uygun olduğu biliniyor demektir.

Etmenleri biliniyorsa tezgahların hangi işler için ve hangi parti büyüklüklerinde, birbirine göre, ne oranda üstün ya da etkin olduğu, etkinlik oranı (O)'nun saptanması ile elde edilir.

$$O_{12} = \frac{E_1}{E_2} \quad (2)$$

## ETMENLERİN SAPTANMASI

Tezgahın tasarım, üretim ve işletme kalitesinden etkilenen bu etmenlerin saptanabilmesi deney gerektirmektedir. Her tezgah kendisine özgü yapısı, yerine takılışı, üzerindeki kesici ve bağlayıcı aygıtları, içinde bulunduğu fabrika ve atelyenin ortamı, onu çalıştıranların davranışlarından etkilenen karmaşık bir sistemdir.

Eğer üretilmekte olan parçalar çok değişik biçim ve parti büyüklüklerinde değilse, çeşit azsa, üretimin sıkışık olmadığı zamanlarda düzenlenecek deneylerle, tezgahların bu parçaların üretimindeki davranışları, etkinlikleri için gerekli veriler kolaylıkla toplanabilir. Çok değişik biçim ve parti büyüklüğünde parça üreten yerlerde ise parçalar, geliştirilmiş sınıflandırma-kodlama yöntemleri aracılığı ile gruplanır, her grup için teknolojik-ekonomik açıdan, grubu temsil edecek bir bileşik parça tasarlanır, deneyler onun üzerinde yapılabilir. OPITZ, VUOSO, BRISCH [2] bu ve benzer amaçlar için geliştirilmiş sınıflandırma yöntemlerine örneklerdir.

## Üretim Hızı Etmeni ( $E_{\dot{U}}$ )

Tanımlamasına göre tezgah kullanım oranı aşağıdaki bağıntı ile gösterilir:

$$K_T = \frac{T_I N_B}{T} \quad (3)$$

$T_I$  : İşlem süresi

$N_B$  : Birim zamanda üretilen parça sayısı

$T$  : Birim zaman

Öte yandan,

$$nT_H + nQT_I = T_V \quad (4)$$

olarak ele alınır;

$$n = \frac{T_Y}{T_H + QT_I} ; N = nQ \quad (5)$$

$n$  : Yıllık parti sayısı

$T_H$  : Tezgah hazırlık süresi

$Q$  : Parti Büyüklüğü

$T_Y$  : Yılda çalışan net süre

$N$  : Yılda üretilen miktar

Üretim hızı etmeni böylece aşağıdaki gibi olur.

$$E_{ij} = K_T \cdot N \quad (6)$$

### Kalite Etmeni ( $E_K$ )

Aynı marka ve modelden de olsa iki tezgah, aynı iş için ayarlandığında, ürünleri arasında farklar bulunur. Ürün gerecinden, tezgah ayarlarından, kesici ve aygıtların davranışlarından, işçi ve diğer etmenlerden kaynaklanan bu farklar nedeni ile ürünlerin özelliklerinde bir dağılım söz konusudur.

Boyutsal, biçimsel, konumsal, metalurjik ve yüzey pürüzlülüğü biçiminde kendini gösteren bu farklar ekonomik tolerans sınırları içinde kalabiliyorsa sorun olmayabilir.

Kalite etmeni, üretilen parçaların tolerans sınırları arasında kalabilme olasılığı olarak tanımlanabilir.

Parça üzerinde pek çok özellikler ve toleransları bulunduğu inceleme, kritik olanlar ele alınarak yürütülebilir. Kritik kalite etmenlerinin çarpımı ile  $E_K$  bulunur.

$$E_K = E_{K_1} \cdot E_{K_2} \dots E_{K_N} \quad (7)$$

Kalite etmeninin saptanması zaman alıcı ve masraflı gibi görülmektedir. Tolerans sınırları arasında kalma olasılığının saptanabilmesi için sıklık (frekans) dağılımının elde edilmesi bunun içinse yeterli sayıda parça üretilmesi, kritik ölçülerin ve özelliklerinin ölçülmesi, istatistiksel sıklık (frekans) dağılımının belirlenip bunun normal dağılım eğrisi biçiminde normalize edilmesi, tolerans sınırları arasında kalan alanın oranının saptanması gerekir. Bu iş bugün, bilgisayarlar aracılığı ile kolaylıkla yapılabilmektedir.

### Çalıştırma Giderleri Etmeni ( $E_G$ )

Bir tezgah çalışırken karşılaştırmada baz olarak alınabilecek toplam çalıştırma giderini veren formül aşağıdadır.

$$G_G = G_A + G_B + G_C + G_K + G_S + G_D + G_I \quad (8)$$

Bu giderler sırasıyla amortisman, bakım, tüketilen güç, kesici giderleri, servis (ısıtma, aydınlatma vb.), tezgaha düşen bina yatırımı nedeni ile gider, işçilik giderleridir.

Daha az gider, daha iyi bir ekonomik etmen olduğundan çalıştırma giderinin tersi etmeni belirler.

$$E_G = \frac{1}{G_G} \quad (9)$$

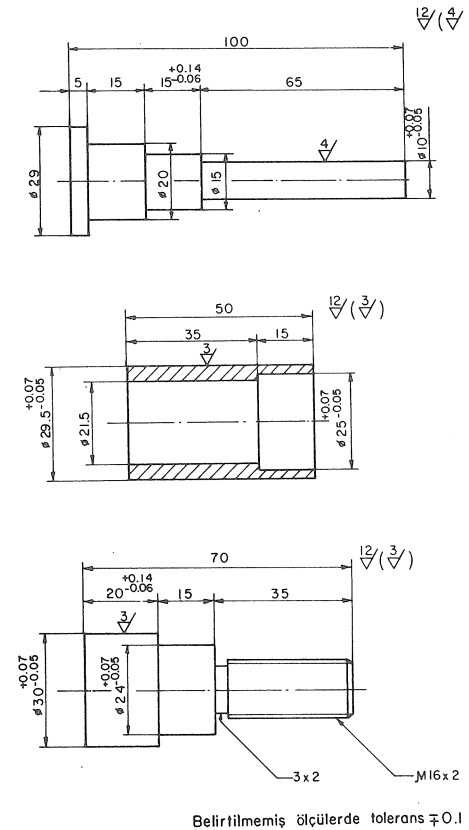
### DENEYSEL ÇALIŞMA

Teorik bir biçimde ortaya konan etkinlik saptama yönteminin uygulanmasında ortaya çıkabilecek güçlükleri belirleyerek yöntemin uygulanabilirliğini göstermek amacı ile deneysel bir çalışma yapılmıştır.

Çalışmada aşağıdaki sıraya uyulmuştur:

1. Laboratuvarında bulunan tezgahlardan üçü deneyde kullanılmıştır. Bunlardan biri rovelver torna, diğer ikisi farklı yapı ve modelde olan puntalı tornadır.

2. Atelyemizde yapılmış ve yapılabileceği varsayılan işlerin resimleri incelenerek sınıflandırma uygulanmış, üç değişik biçimde bileşik parça tasarlanmıştır. Deneyin uygulandığı parçaların resimleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu parçaların sırasıyla 50, 75 ve 100 adetlik partiler halinde üretilcekleri varsayılmıştır.



Şekil 1 Deneyde kullanılan bileşik parçalar

3. İşlemlerde kullanılacak kesici gereçleri ile iş parçasının gerekçeleri belirlenerek yapılan ön deneylerle kesicilere ilişkin Taylor bağıntıları belirlenmiştir. Örneğin HSS kesici ve 265 BHN iş gereci için tek ağızlı kalemde aşağıdaki bağıntı saptanmıştır.

$$VT^{0.16} = 75.9 \quad (10)$$

4. Ekonomik kesici ömrünü veren aşağıdaki bağıntı kullanılarak kesiciler için ekonomik ömürler ve (10) kullanılarak karşılıklı ekonomik kesme hızları saptanmıştır.

$$T_o = \frac{1-n}{n} [TCT + \frac{TC}{M}] \quad (11)$$

n : Taylor bağıntısındaki (n)

TCT: Kesici değiştirme süresi

TC : Bir kesici ağız gideri

M : Tezgah ve operatör için birim zamandaki gider

5. Her bir parçanın bu üç değişik tezgahta, optimum koşullarda, resimlerdeki teknik özellikleri verecek şekilde işlenebilmesini gerçekleştirecek "işlem yapıları" hazırlanmıştır.

6. Tezgahlar bu parçaları işleyecek şekilde hazırlanmış, hazırlık süresince gerekli veriler toplanmıştır.

7. Her bir parça, her tezgahta 25'er adet işlenmiş, bu süre içinde gerekli işlemsel veriler derlenmiş, güç ölçümleri yapılmıştır.

8. Biten parçalar sürmeli kumpas, mikrometre, pasametre, pasimetre (gereğine göre) kullanılarak ölçülmüş, yüzey pürüzlülükleri GOULD Surf-Indicator kullanılarak (Ra) cinsinden saptanmıştır.

9. Amortismanlar, kesici ön ve bileme giderleri, ve diğer veriler toplanmış çizelgeler haline getirilmiştir.

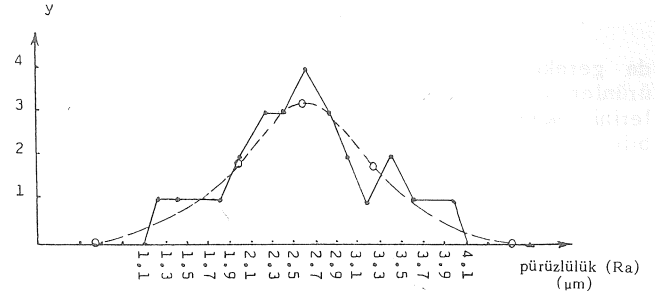
10. Kritik özellikler için frekans dağılımları düzenlenmiş, normal dağılım eğrileri çizilip tolerans sınırları içinde kalma olasılıkları belirlenmiştir. Bir örnek Şekil 2'de gösterilmiştir.

11. Etmenler yukarıdaki tanımlara göre saptanmıştır.

12. Etkinlik etmeni, etmenlerin etkinlik payları 1/1 oranında varsayılarak belirlenmiştir.

13. Bu üç tezgah, bu üç parça için, varsayılmış olan parti büyüklüklerine göre birbiri ile karşılaştırılmış, etkinlik oranları saptanmıştır.

14. İrdeleme yapılmıştır. Örneğin, parti büyüklüklerinin rovelver torna için uygunluğu nedeniyle genelde rovelver torna en etkili görülmekte, ancak bu ölçüt parçadan parçaya değişmektedir. Puntalı tornalar arasında çok önemli etkinlik farkları



No	Aralık µm	Sıklık f
1	1.1-1.3	1
2	1.3-1.5	1
3	1.7-1.9	1
4	1.9-2.1	2
5	2.1-2.3	3
6	2.3-2.5	3
7	2.5-2.7	4
8	2.7-2.9	3
9	2.9-3.1	2
10	3.1-3.3	1
11	3.3-3.5	2
12	3.5-3.7	1
13	3.9-4.1	1

$$L_f = 2.6 \mu m, \quad \sigma = 0.6450, \quad \Delta L_{xn} = 0.5$$

$$y_1 = 3.1, \quad y_{2,3} = \bar{x} = 1.86, \quad y_{4,5} = 0 \quad E_{K_3} = 0.9848$$

Şekil 2 Rovolverde işlenen (1) numaralı parçada Ra=4 µm'lik yüzeyin pürüzlülüğünün sıklık dağılımı

olduğu görülmektedir. Bu, tezgahların özelliklerinin benzerliği nedeniyle. Daha değişik parti büyüklükleri için yeniden derlenecek verilerle etkinliklerin parti büyüklükleri ile olan değişimleri de kolaylıkla izlenebilir.

## SONUÇ

Eldeki takım tezgahlarının teknik ve ekonomik gereksinimleri karşılayacak biçimde kullanılabilmesi verimliliğin artırılmasında önemli bir yer tutmaktadır.

Başbaşı nokta analizi bir ölçüde, seçenekler içinden en uygununu seçmede yardımcı olmakla beraber, bu yöntemde sabit ve değişken giderler gibi bir varsayım yapmak gerekmekte, kalite bir etmen olarak kullanılamamaktadır.

Tezgah etkinliklerinin saptanması yöntemi de, masraflı deney gerektirdiğinden yeterince kullanım alanı henüz bulmuş değildir.

Ancak, iyi örgütlenmiş bir fabrikada sistematik veri toplayarak ve üretimin gevşek olduğu zamanlar-

da gerekli deneyler yapılarak tezgahların, değişik ürünler ve değişik parti büyüklükleri için etkinliklerini ekonomik olarak belirleme olanağı bulunabilir.

İşin niteliğine bağlı olarak etkinlik etmenindeki bireysel etmenlerin etki payları birbirinden farklı tutulabilir.

Çok değişik işler yapan yerlerde sistematik sınıflandırma yöntemine başvurulabilir.

Çok değişik yapı ve yaşta olan tezgahlar için yapılacak çalışmalar sonucunda farklı etkinlik etmenleri çıkabileceği anlaşılmaktadır.

## AN APPROACH TO DETERMINATION OF EFFECTIVENESS OF MACHINE TOOLS

A method which can be used to quantitatively estimate the properties of the machine tools and thus determine their effectiveness for a specific field of application was developed. This method was applied on three different lathes for the same field of application which was composed of predetermined three different component types.

### KAYNAKÇA

- 1 Altınok, N., **An Approach to the Determination of Effectiveness of Machine Tools**, Y.Lisans Tezi, Yönetici M. Karabay, ODTÜ, 1982.
- 2 Wild, R., **Production and Operations Management**, Holt-Rinehart and Wiston,



O.Selçuk YAŞI  
Doç.Dr.,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Ankara

## Ankastre Kirişte Gerilme Dağılımı

### GİRİŞ

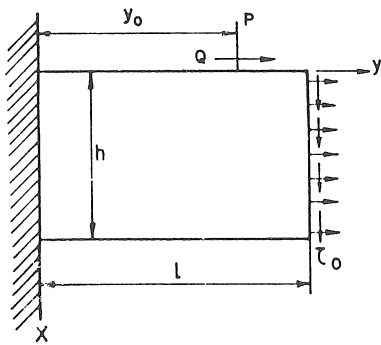
Bu çalışmada ankastre kirişlerdeki gerilme dağılımı herhangi bir yaklaşık kiriş teorisi kullanılmadan düzlem elastisite teorisi kullanılarak bulunmuştur. Formülasyonda Fourier-Integral-Transformasyonu kullanılarak problem simultane üç tekil integral denkleminde indirgenmiştir. Bu denklem takımlarının incelenmesi ile ankastre kirişin sabitleştirilmiş uçlarında gerilmelerin sonsuza gittiği bu nedenle ankastre kiriş tasarımında klasik tasarım yöntemlerinin kullanılmayacağı gösterilmiştir.

### PROBLEMİN FORMÜLASYONU

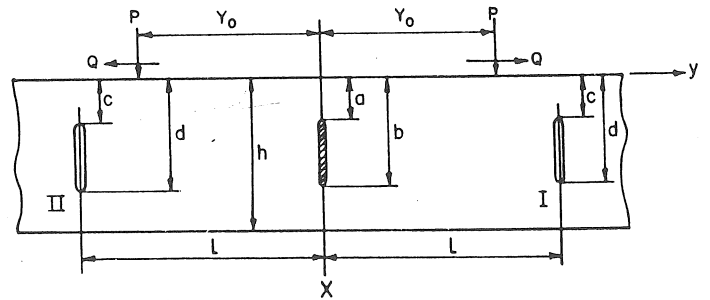
Çalışmada çözümü aranan problem Şekil 1'de verilmiştir. Bu problemi çözebilmek için öncelikle üzerinde simetrik iki çatlak ve ortasında esnemez saplantı bulunan sonsuz şerit elastostatik probleminin çözümü aranmıştır (Bkz. Şekil 2). Şekil 2'de gösterilen bu problemde eğer esnemez saplantı ve

çatlaklar  $x=0$  ve  $x=h$  yüzelerine iletileirse veya başka bir deyişle problemde  $a=c=0$  ve  $b=d=h$  olarak alınrsa esnemez saplantı şeritin iki yarısını birbirinden bağımsız hale getireceğinden Şekil 1'de verilen problemin elde edileceği görülmektedir.

Bu problemin çözümü, tam düzlemde simetrik iki süreksizlik problemi çözümü (iki simetrik çatlak yaratmak için),  $y>0$  yarı düzlemi çözümü (esnemez saplantıyı yaratmak için) ve sonsuz şerit çözümlerinin toplamı olarak elde edilebilir. Problemin formülasyonunun ayrıntıları ve ankastre kirişteki gerilme ve deplasman ifadeleri [1]'de (35) ve (36) numaralı ifadelerde verilmiştir. Bu ifadelerde bilinmeyen olarak görülen  $f(t), g(t), E_1(\alpha), E_2(\alpha), A_i(\alpha)$  ( $i=1, \dots, 4$ ) fonksiyonları ise aşağıda verilen sınır şartlarından elde edilecektir.



Şekil 1 Ankastre kiriş geometrisi



Şekil 2 Üzerinde simetrik iki çatlak ve ortasında rigid saplantı bulunan sonsuz şeritin geometrisi

$$\sigma_{xx}(0,y) = P\delta(y-y_0), \quad 0 < y < \infty \quad (1a)$$

$$\sigma_{xy}(0,y) = Q\delta(y-y_0), \quad 0 < y < \infty \quad (1b)$$

$$\sigma_{xx}(h,y) = 0, \quad 0 < y < \infty \quad (1c)$$

$$\sigma_{xy}(h,y) = 0, \quad 0 < y < \infty \quad (1d)$$

$$v(x,0) = 0, \quad 0 < x < h \quad (2a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x,0) = 0, \quad 0 < x < h \quad (2b)$$

$$\sigma_{yy}(x,\ell) = p_1(x), \quad c < x < d \quad (3a)$$

$$\sigma_{xy}(x,\ell) = p_2(x), \quad c < x < d \quad (3b)$$

Bu ifadelerde, (1a-d) şerit sınır şartlarını, (2a-b) şeritin sabit uç koşulunu ve (3a-b) ise şeritin diğer ucundaki yükleri vermektedir.

Kirişin uç kısmındaki kayma gerilmesi dağılımı

$$\sigma_{xy}(x,0) = m(x) \quad (4)$$

olarak tanımlanır ve (1-3) sınır şartları uygulanırsa problemin bütün bilinmeyenleri  $f(x)$ ,  $g(x)$  ve  $m(x)$  cinsinden ifade edilip; problem  $f(x)$ ,  $g(x)$  ve  $m(x)$  bilinmeyenleri cinsinden aşağıda verilen üç tekil integral denkleminde indirgenebilir [1].

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\mu\kappa(1+\nu)} \int_0^h \left\{ \left[ -\frac{2}{t-x} + \frac{\kappa-3}{t+x} + \frac{12x}{(t+x)} - \frac{8x^2}{(t+x)} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\kappa-3}{t+x-2h} + \frac{12(x-h)}{(t+x-2h)^2} - \frac{8(x-h)^2}{(t+x-2h)^3} \right] \right. \\ & \left. + k_{11}(x,t) \right\} m(t) dt + \int_c^d f(t) k_{12}(x,t) dt \\ & + \int_c^d g(t) k_{13}(x,t) dt = I(x,\epsilon) \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\kappa(1+\nu)} \int_0^h f(t) \left[ \frac{1}{t-x} - \frac{1}{t+x} + \frac{6x}{(t+x)^2} - \frac{4x^2}{(t+x)^3} \right. \\ & \left. - \frac{1}{t+x-2h} + \frac{6(x-h)}{(t+x-2h)^2} - \frac{4(x-h)^2}{(t+x-2h)^3} \right] dt \\ & + \int_0^h m(t) k_{21}(x,t) dt + \int_0^h f(t) k_{22}(x,t) dt \\ & + \int_0^h g(t) k_{23}(x,t) dt = II(x,\epsilon) \quad (6) \end{aligned}$$

$$0 < x < h$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\kappa(1+\nu)} \int_0^h f(t) \left[ \frac{1}{t-x} - \frac{1}{t+x} + \frac{6x}{(t+x)^2} - \frac{4x^2}{(t+x)^3} \right. \\ & \left. - \frac{1}{t+x-2h} + \frac{6(x-h)}{(t+x-2h)^2} - \frac{4(x-h)^2}{(t+x-2h)^3} \right] dt \\ & + \int_0^h m(t) k_{31}(x,t) dt + \int_0^h f(t) k_{32}(x,t) dt \\ & + \int_0^h g(t) k_{33}(x,t) dt = III(x,\epsilon) \quad (7) \end{aligned}$$

$$0 < x < h$$

Bu ifadelerde  $g(x)$  ve  $f(x)$  çatlak yaratan süresizliklerin sırası ile  $x$  ve  $y$  yönündeki şiddetlerini vermektedir.  $\kappa$  ise malzeme sabiti olup düzlem şekil değiştirme problemi için  $3-4\nu$  ve düzlem gerilme problemi için ise,  $(3-\nu)/(1+\nu)$  değerine eşittir. (5-7)'de verilen  $k_{ij}(x,t)$  ( $i,j=1,2,3$ ),  $I(x,\epsilon)$ ,  $II(x,\epsilon)$  ve  $III(x,\epsilon)$  fonksiyonlarının ifadeleri [1]'de ek olarak verilmiştir.

(5-7) denklemleri [2]'de verilen sayısal yöntemlerle çözülebilirler. Bu çalışmada ise, sayısal sonuçlar yerine yine [2]'de verilen yöntemler kullanılıp asimptotik açılımları yapılarak ankastre kirişin sabit uçlarında gerilme dağılımları aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$\lim_{x \rightarrow 0} \sigma_{xy}(x,0) = \alpha(0)(h-x)^\beta x^\beta, \quad -1 < \beta < 0 \quad (8a)$$

$$\lim_{x \rightarrow h} \sigma_{xy}(x,0) \approx \Omega(h)(h-x)^\beta x^\beta, \quad -1 < \beta < 0 \quad (8b)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \sigma_{yy}(x,0) = \frac{h^\beta x^\beta \Omega(0)}{(k+1)\sin \pi \beta} [(1-k)\cos \pi \beta - 2\beta(2\beta+k+5) - 3k - 5], \quad -1 < \beta < 0 \quad (9a)$$

$$\lim_{x \rightarrow h} \sigma_{yy}(x,0) = \frac{h^\beta (h-x)^\beta \Omega(h)}{(k+1)\sin \pi \beta} [-(1-k)\cos \pi \beta + 2\beta(2\beta+k+5) + 3k + 5], \quad -1 < \beta < 0 \quad (9b)$$

Bu ifadelerdeki  $\Omega(0)$  ve  $\Omega(h)$  değerleri  $x \in [0, h]$  aralığında sürekli ve sonlu olan  $\Omega(x)$  fonksiyonunun iki uç noktadaki değeridir.  $\beta$  ise gerilmelerin tekilliğinin şiddeti vermektedir ve aşağıda verilen karakteristik denklemin kökleridir.

$$-2k \cos \pi \beta - 4\beta(\beta+2) + k^2 - 3 = 0 \quad (10)$$

Karakteristik denklemden de görüldüğü gibi tekilliğin şiddeti,  $\beta$ , sadece ortamın Poisson oranı,  $\nu$ 'nün bir fonksiyonu olup çeşitli Poisson oranları için değeri Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1** Gerilme tekilliği şiddetinin Poisson oranı ile değişimi

$\beta$	Düzlem Gerilme durumunda	Düzlem Şekil Değiştirme Durumunda
0.0	0.0	0.0
0.1	-0.1330	-0.1752
0.2	-0.2189	-0.1927
0.3	-0.2888	-0.2417
0.4	-0.3501	-0.2795
0.5	-0.4053	-0.3100

(8a,b) ve (9a,b)'de verilen gerilme ifadeleri daha basitleştirilerek şu şekilde yazılabilir:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \sigma_{iy}(x,0) = F_i(\beta, k, \Omega) x^\beta, \quad i=x, y \quad (11a)$$

$$\lim_{x \rightarrow h} \sigma_{iy}(x,0) = G_i(\beta, k, \Omega)(h-x)^\beta, \quad i=x, y \quad (11b)$$

Bu ifadelerdeki  $F_i$  ve  $G_i$  ( $i=x, y$ ) fonksiyonları, geometrisi ve yüklemesi belirlenen her ankastre kiriş için sabit bir değer olmaktadır.

Bu durumda (11a,b) ve Çizelge 1'in birlikte incelenmesinden kayma gerilmelerinin ve normal gerilmelerin ankastre kirişin sabit uçlarında sonsuza gittiği açıkça görülmektedir. Bu da klasik tasarım yöntemlerinin ankastre kirişler için uygulanamayacağını açıkça göstermektedir. Yapı ve makina aksamı tasarımında mümkün olduğunca kaçınılan ve en zayıf bilinen ankastre kirişlerin tasarımı klasik tasarım yöntemleri yerine kırılma mekaniği yöntemleri kullanılarak yapılmalıdır.

## STRESS DISTRIBUTION IN CANTILEVER BEAMS

In this paper the general plane for a semi-infinite strip held rigidly on its short end, containing a crack perpendicular to its boundaries is considered. Strip is under the effect of concentrated loads at its boundaries. By extending the crack to the surfaces, the problem is reduced to that of cantilever beam.

Integral transform technique is used to provide an exact formulation of this problem in terms of a system of three singular integral equations. Stress singularities at the beam corners are obtained from the singular integral equations.

# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ, Türkiye'de makina tasarım ve imalatı konularında bilgi ve teknoloji birikimini geliştirmek amacı ile kurulmuştur. Bu amacı gerçekleştirmek için başlıca şu faaliyetlerde bulunmayı planlamaktadır.

- a) Makina tasarımı ve imalatı ile ilgili konuların geliştirilmesini teşvik etmek, bunların yayılmasına çalışmak, konu ile ilgili teknolojinin gelişmesini sağlamak,
- b) Üyelerin mesleki yönden gelişmeleri için çaba harcamak, meslek içi eğitim olanakları araştırmak,
- c) Benzer amaçlarla kurulmuş ve kurulacak olan ulusal dernek veya uluslararası derneklerle Bakanlar Kurulundan gerekli izin alındıktan sonra işbirliği yapmak,
- d) Bilimsel toplantılar, konferans, kurslar, seminerler düzenlemek,
- e) Meslek sergileri açmak, dergi yayınlamak, çeşitli yayınlar yapmak.

## DERNEK ÜYELERİNE SAĞLANAN KOLAYLIKLAR

- a) Makina Tasarım ve İmalat Dergisine ücretsiz abone olacaklardır.
- b) Bilgi Erişim Birimi hizmetlerinden indirimli olarak yararlanacaklardır.
- c) Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongrelerinde sağlanabilecek özel imkanlardan yararlanacaklardır.
- d) Dernek yayınlarını ücretsiz/indirimli olarak alabileceklerdir.
- e) Firmaların teknolojik bültenleri ücretsiz olarak adreslerine gönderilecektir.
- f) Kitap, bildiri vb., yayınları öncelikli olarak basılacaktır.

## ÜYELİK ÖDENTİSİ

1986 yılı için 5.000 TL/yıl'dır. Üyeliği kabul edilenlerin bu ödemeyi aşağıdaki banka hesabına yatırmaları gerekmektedir.

**Makina Tasarım ve İmalat Derneği**  
**T.İş Bankası**  
**ODTÜ Şubesi ANKARA**  
**Hesap No: 6610-0235339**

### TPAO-ODTÜ MATİMAREN KODLAMA, KATALOG YAPMA ve STOK KONTROL ÇALIŞMALARI

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Makina Tasarım ve İmalat Araştırma Merkezi (MATİMAREN) tarafından ortaklaşa yürütülen proje çalışmaları, TPAO'ya ait malzemelerin kodlama, katalog yapma ve stok kontrol konularında 3 yılı aşkın bir süredir sürdürülmektedir. TPAO bünyesinde stoklanmış yaklaşık 125 000 çeşit malzeme bulunmakta olup, bu malzemelerin kodlama ve katalog yapma çalışmalarına TPAO tarafından fiilen 1971 yılında başlanılmıştır. Çalışmaların başladığı bu tarihten 1983 yılına kadar kodlanan malzemelere stok numaraları elle verilmekte ve hazırlanan katalogları matbaalarda çoğaltılarak dağıtılmakta idi. Bu işlemlerin büyük emek ve zaman kaybına yol açtığı gözlenmiştir. Geleneksel olarak elle hazırlanan ve matbaalarda çoğaltılan bu katalogların güncelleştirilmesindeki zorluklar bilinmektedir.

Bunun yanında, eşdeğer malzeme olarak adlandırılan ve çok değişik gruplar içinde olduğu halde nitelikleri aynı olduğu için aynı kod numarası alması ve belli bir ambarda bulundurulması gereken malzemelerin, binlerce kalem malzeme arasında elle yapılan işlemler ile bulunarak ayıklanabilmesi esas itibarı ile mümkün görülmemektedir. Stok kontrol sistemini bu gibi sakıncalı durumlardan arındırabilmek için, malzemelerin kodlanması ve kataloglarının hazırlanması konusunda daha sağlıklı ve güncel bilgilerin kataloglarda yer almasını sağlamak ve katalogun elde edilmesinde geçecek zaman kaybını en aza indirmek amaçlanarak bu işlemlerin bilgisayar kullanımıyla yapılması yoluna gidilmiştir. İlk başta TPAO'nun bilgi işlem merkezi ve ODTÜ merkezi bilgisayarından yararlanma yoluna

gidilmişse de, yapılan çalışmaları hızlandırmak amacıyla TPAO ikmal grup başkanlığına alınan Honeywell DPS 6/22 bilgisayarında ve ODTÜ MATİMAREN'e ait bilgisayarlarda çalışmalar sürdürülmektedir.

1983 yılından buyana yapılan proje çalışmaları sonucu malzeme gruplarının kodlanması ve kataloglarının bilgisayar yardımıyla hazırlanması konusunda oldukça önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Şimdiki durumda yaklaşık 125 000 kalem olan TPAO'nun ambar mevcutlarının % 40 kadarının katalogları bilgisayar aracılığı ile yapılmıştır. Diğer malzemeler de, öncelik sırasına göre ele alınarak, bilgisayara uyarlama çalışmaları sürmektedir.

TPAO'ya ait malzemeler, tüm stok kontrol işlemleri merkezden yapılacak malzemeler, stok kontrol işlemleri bölgelere bırakılacak, ancak merkezden izlenecek malzemeler ve tüm stok kontrol işlemleri bölgelere bırakılan malzemeler olmak üzere 3 ana sınıfa ayrılmıştır. Stok kontrol çalışmalarının bilgisayar kullanılarak yapılması amacıyla TPAO genel müdürlüğü ikmal grup başkanlığında bulunan Honeywell DPS 6/22 bilgisayarını, Batman ve Trakya bölgelerinde bulunan Honeywell 6/10 bilgisayarları kullanılmaktadır. Şu anda merkezden stok kontrolü yapılacak malzemelerin ambar girişlerinin bilgisayarlara girilme işlemlerine ve merkezi stok kontrol için gerekli alt yordamların hazırlanmasına devam edilmektedir. Bu seneki proje döneminin sonu olan Mart 1987 tarihine kadar toplam 10 000 kalem malzemenin merkezi stok kontrolüne alınması planlanmaktadır.

---

Bu sayfada tüm araştırma kurumlarımızın ve sanayi kuruluşlarının biten ya da devam eden araştırma geliştirme projelerini tanıtmayı amaçlıyoruz.

---

## ODTÜ METALURJİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜNDE 1985 YILINDA TAMAMLANAN DOKTORA TEZLERİ (Başlık, öğrenci, tez yöneticisi)

Elyaf sarmalı cam lif takviyeli plastik boruların basma ve çevresel çekme gerilimleri altındaki (Hilmi GÜLER, Prof.Dr. Alpay ANKARA)

Amonyum karbonat çözeltisi içindeki düşük dayançlı çelikte çatlak büyüme hızının akma kırılma mekaniği parametreleriyle ilişkisi (Filiz SARIOĞLU, Prof.Dr. Mustafa DORUK)

## ODTÜ MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜNDE 1985 YILINDA TAMAMLANAN YÜKSEK LİSANS TEZLERİ

(Başlık, öğrenci, tez yöneticisi)

Güneş enerjisi ısı depolama tankları üzerine bir çalışma (Şakir ERGİN, Doç.Dr. Faruk ARINÇ)

Isıtılmış yatay bir boru içerisinde akan kaynamakta olan Freon-II'e ısı transferi (Abdülgani YAZAN, Prof.Dr. Orhan YEŞİN)

Isıtılmış yatay bir kanalda akan iki fazlı karışımlarda basınç düşümü (Serdar YURT, Prof.Dr. Orhan YEŞİN)

Hipersonik rüzgar tüneli tasarımı (Züheyir ALSALİHİ, Prof.Dr. Orhan KURAL)

Büyük yapıların sonlu elemanlar ve alt yapıların sentezi yöntemleriyle, titreşim analizi (Eşref EŞKİNAT, Doç.Dr. Nevzat ÖZGÜVEN)

Kirişler için en iyi dinamik titreşim yutucuları (Bülent ÇANDIR, Doç.Dr. Nevzat ÖZGÜVEN)

"Postcuve" ve ani sıcaklık değişiminin karbon elyafli plastiklerin davranışı üzerine etkileri (Ali ETİZ, Doç.Dr. Ö.Gündüz BİLİR)

Dikdörtgen plaklardan oluşan yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik analizi (Cihangir ÖNAL, Doç.Dr. Samim ÜNLÜSOY)

Dokuma esnasında çözgü regülatörünün analiz ve performansı (Murat BOZDAĞ, Y.Doç.Dr. Turgut TÜMER)

Elastik elemanlı mekanizmaların sonlu elemanlarla analizi (A.Nadi SAKAOĞLU, Y.Doç.Dr. Turgut TÜMER)

Telli elektriksel aşındırma ile işlemede (Wire E.D.M.) işlem parametrelerinin deneysel incelenmesi (Tanju ARDALI, Doç.Dr. Abdülkadir ERDEN)

Bilgisayarla düzlemsel mekanizmaların sentezi (Mehmet POLAT, Doç.Dr. Eres SÖYLEMEZ)

Tek pasolu frezeleme işlemlerinin geometrik programlama yöntemi ile optimizasyonu (M.Celalettin AYDEMİR, Doç.Dr. Hakkı ESKİCİOĞLU)

Masa tipi bir torna tezgahının tasarım ve prototip imalatı (İ.Hakkı BAYKA, Y.Doç.Dr. R.Orhan YILDIRIM)

RFI ve EMI'ı bastırmak için plastik gövdeleri kaplayan bir metal tel püskürtme ünitesinin tasarımı konstrüksiyon ve uygulaması (Bektaş ERDOĞAN, Doç.Dr. Abdülkadir ERDEN)

Eksenel-akışlı kompresörlerde kayıp ve sapma açıları üzerine bir inceleme (Mete ÇETİN, Prof.Dr. Ahmet ÜÇER)

Yatay bir boruda iki fazlı akımların kararsızlığı (Yurdağül KAKAÇ, Doç.Dr. Hafit YÜNCÜ)

Elipsel delikli yorulma deneyi numunelerinde çatlak ilerlemesi (Recep DEVECİ, Doç.Dr. Ö.Gündüz BİLİR)

Mekikli dokuma tezgahlarının atkı atma mekanizmalarının analizi ve modellemesi (Ertuğrul SEVER, Y.Doç.Dr. Mehmet ÇALIŞKAN)

Bir Banki türbününün tasarımı, imalatı ve çalışma koşullarının belirlenmesi (Attila ARSAN, Doç.Dr. Cahit ERALP)

Kademesiz hız değiştiricileri üzerine bir inceleme ve bir kademesiz hız değiştiricinin tasarımı ve imali (Muhammed AÇAN, Doç.Dr. Eres SÖYLEMEZ)

Düşey olarak aralıklı iki yatay silindirden laminer doğal konveksiyonla ısı transferi (Mehmet BEZZAZOĞLU, Dr. Ediz PAYKOÇ)

Bir termik güç santrali optimum kontrolü için gözlemci tasarımı (Ali Ünsal KAMÇICI, Doç.Dr. Ali DURMAZ)

Eksenel akışlı bir deney kompresörü tasarımı ve imalatı (Ö.Etka HATİP, Doç.Dr. Cahit ERALP)

Gerilmesiz sınır koşulları olan yarı sonsuz uzayda konik çatlak (K.Levent PARNAS, Doç.Dr. Selçuk YAŞI)

Malta haçı mekanizmalarının kinematik ve dinamik analizi (M.Bülent YENİÇERİ, Doç.Dr. Eres SÖYLEMEZ)

Bilgisayar yardımı ile mekanizma tasarımı (M.Nebi SAVCI, Doç.Dr. Eres SÖYLEMEZ)

Yüksek hızlı yüksek mekanizmalarının analizi sentezi ve bilgisayarla kinematik tasarımı (Niyazi BÜKE, Doç.Dr. Eres SÖYLEMEZ)

Genel amaçlı klasik bir torna tezgahının bilgisayar sayısal denetimine çevrilmesi (F.Feyhan BUMİN, Doç.Dr. Hakkı ESKİCİOĞLU)

Kutu kesitli kren köprü kirişlerinin bilgisayar yardımıyla optimum tasarımı (Murat S. ÇALIŞKAN, Doç.Dr. Samim ÜNLÜSOY)

Küp patates için akışkanlaştırılmış, yataklı bir kızartma-kurutma aygıtının tasarımı ve imali (Uğur AYKĖN, Doç.Dr. Birol KILKIŞ)

Dairesel delikli yorulma deney numunelerinde çatlak ilerlemesi (Faik HAZNEDAR, Doç.Dr. Ö. Gündüz BİLİR)

Yavaş hareket eden hidrolik tahrik sistemlerinin davranışlarının darbe genişlik modülasyonu kullanılarak Diter yöntemiyle iyileştirilmesinin deneysel araştırması (S.Mohamad HARB, Doç.Dr. Bülent PLATİN, Prof.Dr. Yücel ERCAN)

### **ODTÜ METALURJİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜNDE 1985 YILINDA TAMAMLANAN YÜKSEK LİSANS TEZLERİ**

(Başlık, öğrenci, tez yöneticisi)

Hassas dökümde diamonyum fosfatın bağlayıcı olarak kullanımı (Levent TUNCER, Prof.Dr. Ekrem SELÇUK)

Karbon elyaf, takviyeli epoksi birleşik malzemelerde sertleştirme yapı çevresel dayanıklılık dinamik mekanik özellik bağıntıları (Özcan KONUR, Prof.Dr. Alpay ANKARA)

Bakır kalay kükürt sisteminde faz ilişkileri ve termodinamik (A.Selim BILGIN, Doç.Dr. Hürman ERİÇ)

Metal tozlarının mikroyapılarının incelenmesi (Ali KALKANLI, Prof.Dr. Eti UYGUR)

Çalıdağ lateritlerinden nikel kazanımı üzerine bir çalışma (Melih YÜKSEL, Doç.Dr. Yavuz TOPKAYA)

Aluminyumun integral renklendirilmesi (Renan DİKEL, Doç.Dr. Naci SEVİNÇ)

Güleman krom cevherinin elektrik ark fırınıyla çelik yapımında kullanılması (Mustafa ÖZTÜRK, Doç.Dr. Ahmet GEVECİ)

Murgul reverberiy fırın bakır cürufalarının elektrik indüksiyon fırınında değerlendirilmesi (Ergül ATANER, Doç.Dr. Ahmet GEVECİ)

İkili ostenitlenmiş ve menevişlenmiş AISI M2 yüksek hız çeliğinin metalografisi (Ayşegül GÜNGEN, Doç.Dr. Erdoğan TEKİN)

Kromat dönüşüm kaplamaların sıcak daldırma galvanizlenmiş çeliğin korozyon direncine etkisi (Ahmet TOKMAKÇIOĞLU, Prof.Dr. Mustafa DORUK)

Hidrojen redüklemeye yöntemiyle APT'den tungsten metal tozu üretimi (Mehmet DAYIOĞLU, Doç.Dr. Yavuz TOPKAYA)

Uludağ şelit flotasyon konsantrelerinin otoklavda soda ile liçi (İvgen ÖZDAL, Doç.Dr. Hürman ERİÇ)

### **ODTÜ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜNDE 1985 YILINDA TAMAMLANAN YÜKSEK LİSANS TEZLERİ**

(Başlık, öğrenci, tez yöneticisi)

Esnek yerleşim düzeni için çizelgeleme (Gürsel SÜER, Doç.Dr. Cihan DAĞLI)

Bir dökümhane için malzeme ihtiyaç planlama sistemi uygulaması (Selim TALU, Doç.Dr. Cihan DAĞLI)

Çok kademeli malzeme ihtiyaç planlaması sistemleri için ısmarlama miktarlarının saptanmasında sezgisel yöntemler (Sedef MERAL, Doç.Dr. Cihan DAĞLI)

Ulaştırma probleminin hesaplanması sorunları üzerine bir çalışma (Yeşim ERKE, Doç.Dr. Ömer BENLİ)

İki boyutlu ve dikdörtgen parçalı stok kesim probleminde buluşsal bir yaklaşım (Cemil SAYEK, Doç. Dr. Cihan DAĞLI)

Türk şeker endüstrisinde üretim planlaması için bir yaklaşım (Nurtekin OYMAN, Doç.Dr. Ömer BENLİ)

Baskılı devreler kalite kontrolünde görsel denetimin iyileştirilmesi (Belgin EZER (KALAYCIOĞLU), Y.Doç.Dr. Tayyar ŞEN)

Kapasite kısıtı altında, çok ürünlü sistemlerde kafale büyüklüklerinin saptanması (Lütfü ÇAMLİBEL, Y.Doç.Dr. Ömer KIRCA)

Türk standartları enstitüsü'nün belgelendirme faaliyetlerine bir metod geliştirilmesi (Betül ARSLANTÜRK (TALU), Prof.Dr. Ömer SAATÇIOĞLU)

Üniversite ders programlarını bilgisayarla hazırlayan bir sistemin tasarımı (Pınar ÖZERMAN, Doç.Dr. Ömer BENLİ)

Büyüme ve dağılım amaçlarının proje değerlendirme ile bütünleştirilmesi: Çorum-Çankırı kırsal kalkınma projesi üzerine bir uygulama (Ülgen AKIN, Prof.Dr. Metin CELASUN)

Isınma amacıyla kullanılan linyit için depo yer seçimi ve dağıtım problemi (Pınar AYAROĞLU (KARATAYLI), Doç.Dr. Çağlar GÜVEN)

Petrol arama yatırımlarında risk analizi için bir simülasyon modeli (Ülker AYDIN, Prof.Dr. Halim DOĞRUSÖZ, Hayri ÖNAL)

## ENDÜSTRİYEL GÜRÜLTÜ KONTROLÜ

Doç.Dr. H. Nevzat ÖZGÜVEN

TMMOB, Makina Mühendisleri Odası, Yayın No: 118, 1985

Endüstriyel gürültü denetimi konusundaki çalışmalar özellikle 1970'ten sonra yoğunluk kazanmış, yayınlanan kitap, bildiri ve teknik rapor sayısında büyük artışlar gözlenmiştir. Ülkemizde de son yıllarda sanayiden gelen istemlerin ve endüstriyel gürültü konusundaki şikayetlerin artması nedenleri ile gerek İSGÜM gerekse üniversiteler tarafından çeşitli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu türden çalışmaların öncülerinden biri olarak nitelendirilebilecek bu çalışma, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Doç.Dr. H.Nevzat ÖZGÜVEN tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk kez 1982 yılında sanayi kuruluşlarında görevli elemanlara yazar tarafından verilmeğe başlanan ve SEGEM'in öncülüğü ile düzenlenen bir haftalık Endüstriyel Gürültü Denetimi seminerleri için hazırlanmış olan notlar genişletilerek Endüstriyel Gürültü Kontrolü kitabı oluşturulmuştur. Seminerler sanayide çalışan kişilerin meslek içi eğitimine yönelik olduğu için kitap ders kitabı niteliğinden çok uygulamacılara yardımcı olmayı amaçlamakta ve uygulamada karşılaşılabilecek sorunlardan çokça örnekler içermektedir. Kitap sekiz bölümden oluşmakta olup kitabın sonuna ilgili konuda daha fazla bilgilenmek gereğini duyan okuyucular için 22 kaynaklı bir kaynakça eklenmiştir. Ayrıca en sonda yer alan ve ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü ilgili öğretim üyelerinin tartışma süzgecinden geçirilmiş olan Türkçe-İngilizce ve İngilizce-Türkçe terimler sözlüğü, gelecekte bu konuda yapılan çalışmalarda kullanılacak anlatım dilinin güzelleştirilmesi ve geliştirilmesi ile ilgili terimlerin standartlaştırılması yönlerinde atılmış önemli bir adımdır.

Kitabın birinci bölümünde kuramsal ayrıntıya girilmeden temel ses bilgisi anlatılmış ve daha sonraki bölümlerde kullanılacak nesnel (objektif) terimlerin açıklamaları ve tanımları verilmiştir. Bu bölüm için eleştirilecek tek nokta, bölümün ilk kısmının bolca örnekle donatılmasına karşın sıklık (frekans) çözümlemesi (analizi) konusunda hiç örneğe yer verilmemiş olmasıdır. Daha sonraki bölümlerde bu konuda örnekler sıkça verildiği için ilk bölümde yalnızca tanım ve açıklama ile yetinilmesinin daha doğru olacağı kanımca yazar tarafından düşünülmüş olabilir.

İkinci bölümde ses yüksekliği gibi öznel (subjektif) kavramlar ile gürültü ölçütleri ve ses düzeyi tartışılmış, tanım ve kavramlar yeterli sayıda örnekle pekiştirilmiştir. Özellikle son yıllarda kullanılmaya başlanan Eşdeğer Sürekli Ses Düzeyi ile Ses Etkilenim Düzeyi tanımlarının bu bölümde yer alması, yapıtın çağdaşlığına ayrı bir anlam kazandırmaktadır.

Üçüncü bölümde gürültünün insanlar üzerindeki etkileri ve gürültü ölçümü konusu tartışılmaktadır. Duyma işlevine çok kısa değinilen ve kulak yapısı ile ilgili hiç bir şekil ve resmin yer almadığı bu bölümde verilen örnekler Amerika OSHA standardının yanı sıra ISO/R 1999 ve TS2607'ye uyarlanabilseydi kuşkusuz çok daha yararlı olacaktı. Bunun yanı sıra, çevre gürültüsü ile ilgili kısmın bu bölümde yer alması, kanımca olumlu bulunmakla birlikte gürültü ölçümleri ile ilgili herhangi bir durum çalışmasının verilmemiş olması ise bir eksiklik olarak görünmüştür. Bu bölüme bir sanayi işletmesinde işçilerin işitme duyularını korumak için nasıl bir programın izlenmesi gerektiği konusunda bir kısmın eklenmesinin yararlı olacağı kanısındayım.

Dördüncü bölümde endüstriyel gürültü kaynaklarının yaydıkları gürültünün ses gücü düzeylerinin yaklaşık olarak nasıl hesaplanabileceği anlatılmış ve konular, uygulamadan alınan örneklerle ve görsel açıdan nomogramlar ile pekiştirilmiştir.

Beşinci ve altıncı bölümlerde, sesin sırasıyla serbest alanda ve yankılanım alanında yayılması tartışılmıştır. Atmosferik ses yutumu ve yapı malzemelerinin ses yutma katsayılarının da verildiği bölümler yeterli sayıda örnek ile donatılmıştır.

Yedinci bölüm bütünüyle gürültü denetimine ayrılmıştır. Uygulamadan alınan çok güzel bir örnek (dairesel hız testeresinin gürültü denetimi) ile başlayan bu bölümde planlama ve bakım ile gürültü denetimi, duvarların gürültü azaltması, kaynağın örtülmesiyle gürültü denetimi, bariyerlerle gürültü denetimi, susturucularla gürültü denetimi, kulak koruyucularıyla gürültü denetimi vb konular ele alınmaktadır. Uygulamadan bol örneğin verildiği bu bölümde tartışılan hava kanallarında ses yutucu ile gürültü denetimi konusunda yaklaşık hesaplama yöntemlerinin belirtilmesi ve bu konuda bir örneğin verilmesi çok yararlı olacaktı. Buna karşılık akışkan kaynaklı gürültünün önlenmesine yönelik küçük bir kısmın bu bölüme çeşni kattığı görüşündeyim. Umarım, ikinci baskıda bu kısım daha da genişletilerek okuyucunun yararına sunulur.

Sekizinci ve son bölüm titreşim yalıtımı ve titreşim sönümlenmesiyle gürültü denetimini konu almaktadır. Temel titreşim bilgisi, titreşim yalıtımı ve titreşim yalıtımında kullanılan malzemelerin tartışıldığı; sönümlenmeyle titreşim denetiminin ayrıca anlatıldığı bu bölüm bir bütün içinde bakıldığında kitapta yer alan diğer konuları tamamlayıcı niteliktedir.



Kontrol yerine denetim sözcüğünün kullanılması kişisel tercihim olduğu için yukarıdaki tanıtma yazısında sürekli denetim sözcüğünü kullandım. Tanıtılan yayının isminin Endüstriyel Gürültü Denetimi olarak değiştirilmesi kanımca çok daha yerinde olacaktır. Ayrıca, ilgili konuda Türkçe olarak yazılmış bildiri, rapor gibi çalışmaların alıntılar yapılarak kaynakçada belirtilmesini önermekteyim.

Özetle, Endüstriyel Gürültü Kontrolü kitabını her teknik elemanın, iş güvenliği ve işçi sağlığı ile ilgili herkesin kütüphanesinde bulunması gerekli değerli bir yapıt olarak görmekteyim.

**Y.Doç.Dr. Mehmet ÇALIŞKAN**  
**ODTÜ, Makina Müh. Bölümü**

#### **MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ TARAFINDAN**

#### **SATIŞA SUNULAN BİLDİRİ KİTAPLARI**

##### **1. ULUSAL MAKİNA TASARIM VE İMALAT KONGRESİ BİLDİRİ KİTABI**

Makina Tasarımı, Bilgisayar Yardımıyla Tasarım ve İmalat, Üretim Yöntemleri, Fabrika Organizasyonu, Malzeme Seçimi ve Sorunları konularında toplam 68 bildiri içermektedir. Ederi: 3000 TL, Dernek üyelerine: 1800 TL.

##### **2. ULUSAL MAKİNA TASARIM VE İMALAT KONGRESİ BİLDİRİ KİTABI**

Bilgisayar Yardımı ile Üretim Planlaması, Bilgisayar Yardımı ile Tasarım, Bilgisayar Yardımı ile İmalat, Titreşim ve Gürültü, Takım Tezgahları, Kalite Kontrolü, Makina Tasarımı, Malzeme Sorunları, Triboloji konularında toplam 52 bildiri içermektedir. Ederi: 5000 TL, Dernek üyelerine: 3000 TL.



17-19 Eylül 1986  
ODTÜ-MATİMAREN-ANKARA

Bilgisayar Destekli Operasyon Planlamada Bir Uygulama  
G. ULUSOY, R. UZSOY, İ. TURFANDA, L. ALATLI, M. UZUNER

Montaj Hattı Dengelemesinde Bir Uygulama  
G. ULUSOY, M. BÜYÜKABACI, Z. BEKAR

Uzman Sistemlerin Üretim Planlamadaki Yeri  
C. DAĞLI

Hüresel ve Esnek İmalat Sistemlerinde Yeni Bir Malzeme Yönetim Sistemi  
S. DURMUŞOĞLU, B. DURMUŞOĞLU

Grup Teknolojisi Uygulaması Üzerine Mikro-Bilgisayar Destekli Ekonomik İnceleme  
M. KARABAY, A.B. TUNCER

Süreç Planlaması İçin Bir CAD Sistemi  
S. ACAR, K. CASE, J. BENNATON

Bilgisayar Yardımıyla Dişli Çark Tasarımı  
F. TİNİŞ

Kuvvet Büyüten Bir Dört-Çubuk Mekanizmasının Bilgisayarla Tasarımı  
İ.D. AKÇALI, N. GEREN

Tornaların Fener Milinin Bilgisayar Yardımıyla Tasarımı  
G. DAĞ, İ.H. FİLİZ

Çok Parçalı Sistemlerin Geometrik Analog Bilgisayar Modeli Yardımıyla Analizleri  
E. GÜRSEL

Elektro-Erozyon ile İşleme (EDM) Performansının Bilgisayarlı Denetiminin Gerçekleştirilmesi  
C. ÇOĞUN, A. ERDEN

Klasik Bir Torna Tezgahının Sayısal Denetimli Tezgaha Dönüştürülmesi  
H. ESKİCİOĞLU, B.E. PLATİN, F. BUMİN, G. SÖZMEN, B. ÇELİK

Ülkemizde Üretilen Bir Torna Tezgahının Sayısal Kontrollü Hale Dönüştürülmesi  
E. UYAR, R. AKIN

Malzemelerin Kodlama ve Bilgisayar Yardımıyla Malzeme Kataloglarının Hazırlanması  
A.H. ÜNAL, M.İ. GÖKLER, F. ARINÇ

Elektro-Erozyon ile İşlemede (EDM) Deney Sayısının Saptanması  
H. DARENDELİLER, C. ÇOĞUN, A. ERDEN

Sayısal Mesaj Terminali (SMT) Gösterge Penceresi İçin Malzeme Seçimi  
S. YAŞAR

Taşıt Titreşimlerinin İstatistiksel Olarak İncelenmesi  
İ. UZMAY, K. BAYTAZ

Aselsan 4865 UHF/FM Motosiklet Telsizine Şok İzalatörleri Tasarımı  
A. KÜÇÜK

Hidrolik Sistemlerde Akışkandan İletilen Gürültü Problemi ve Çözüm Esasları  
B. TUÇ

Kuvvet Santrallerinde Gürültü Kaynaklarının Sıralanması ve Denetimi  
M. ÇALIŞKAN, N. ÖZGÜVEN

Pratik Sonotrod Tasarımı  
L. ÖZKAN

Takım Tezgahları İçin Dinamometre Tasarımı  
M. KARABAY, S. KARABAY

Hidrostatik Varyatörle Kesme Hızının Ayarlanması  
Y. ÇAVUŞOĞLU, N. TARAKCIOĞLU

Sıcak Talaşlı İşlemede Optimum Kesme Koşullarının Araştırılması  
A. ÜNÜVAR

Takım Tezgahı Kızağının Dinamik Karakterinin Bilgisayar Yardımı ile Simülasyonu  
Ö. ANLAĞAN, B. DOYUM

Takım Tezgahlarında Dinamik Özelliklerin Tasarım Aşamasında Belirlenmesi  
M. TEKELİOĞLU

Üretim Hatlarında Endüstriyel Kalite Kontrol Uygulaması İçin Bir Yöntem  
H. BAŞLIGİL

Kalite Kontrolünde Tezgah Hassasiyeti Sorunu  
M. KUMRU

Fındık Harman Makinalarına İlişkin Tasarım İlkeleri ve Bazı Öneriler  
A. BOZACI

Çöp Yakan Akışkan Yataklı Bir Yakıcının Tasarımı  
E. EKİNCİ, M. TOLAY, H. ATAKÜL

Yüksek Basıncılı Pompa ve Motorlarda Dişli Elastik Deformasyonunun Teorik Analizi  
E. KOÇ, F. CANBULUT

Dişliçarklarda Dişdibi Gerilme Analizi  
N. TAHRALI

Döner Tabaklı Besleyicilerin Deneysel Kapasite Analizi  
S. ÜNLÜSOY, N. ÖZCAN

Çağdaş Değişken-Hızlı Tahrik Sistemleri  
H.B. ERTAN

Vidalı Mekanizmaların Kuru Sürtünme Etkisinde Dinamik Analizi  
K. ÖZGÖREN

Mekikli Dokuma Tezgahları Atkı Atma Düzenineğinin Modellenmesi  
T. TÜMER, E. SEVER, M. ÇALIŞKAN

Robot Kollarda Yörünge Planlaması ve Evrik Kinematik  
T. BALKAN, B. KAFTANOĞLU

Yüzey Sertleştirilmiş Çeliklerde Yorulma Dayancının Hızlandırılmış Yöntem ile Saptanması  
S. GÜNGÖR, Ş. BOR

Saf ve Alaşımli Alüminyumun Sıcak Burulma Deneyleri  
U. BALKIR, S. ALTINTAŞ, S. ONURLU, M. GEVREK

Takım Çeliklerinde İyapının Kırılma Tokluğu Üzerindeki Etkisi  
E. TEKİN, B. ÖGEL

Madencilikte Kullanılan Aşınma Dayançlı Demir Alaşımları  
E. TEKİN

Ekstrüzyonda Şekil Değiştirme Analizi Üzerine  
Ş.B. ALTAN, S. ONURLU

Malzemelerin Plastik Şekil-Değiştirme Özelliklerinin Bilgisayar Yardımı ile Modellenmesi  
B. KAFTANOĞLU, Y. KADIOĞLU, M. KARAYAKA

Al ile Söndürülmüş Çelik Saçlarda Biçimlendirme Haritaları  
A.Ç. ÇÖPLÜ, T. ÖZTÜRK

Biçimlendirme Sınır Diyagramının Endüstriyel Uygulanması  
İ. ÇANAKÇI, V. EREN, S. ALTINTAŞ

Tabakalı Bileşik Levhaların Analizi İçin Bir Sonlu Eleman Yöntemi  
S. ORAL, B. KAFTANOĞLU

Değişken Yüklü Salınım Hareketi Yapan Kaymalı Yatak  
M. GEDİKTAŞ, S. DİNÇ

Korozyonda Tasarımın Önemi  
A. ÇAKIR

Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümünde İleri Fiber-Optik Sistemin Tasarımı ve Uygulanması  
B.S. YILBAŞ, K. DANIŞMAN

Asbestsiz Sürtünme Malzemelerinin (Balataların) Yapımı ve Uygulanması  
N. GEMALMAYAN

Abrasiv Aşınma Mekanizmasında Yüzey Basıncının Aşınmaya Etkisi  
M.B. KARAMIŞ

Soğuk Deformasyonla, Aşınma Direnci Arttırılabilir  
M.Y. GÜRLEYİK

İlgili tüm kongre vb., toplantıların duyurularını ve bildiri kitabı olan kongrelerin bildiri başlıklarını yayınlamak üzere bekliyoruz.

# SEMİNER ÇAĞRISI

## ENDÜSTRİMİZİN ÖZEL TEKNOLOJİK PROBLEMLERİ

Teknolojinin hızla geliştiği çağımızda sanayi-leşmenin getirdiği teknolojik mühendislik problemlerinin hızla çözüme ulaştırılmasında Üniversite-Endüstri işbirliği kaçınılmaz bir gerçektir. Bu gerçekten hareketle endüstrimizin karşılaştığı problemlerin çözümünde, ODTÜ'deki mevcut bilimsel ve teknolojik potansiyelin katkısını sağlamak amacıyla ODTÜ-MATİMAREN bünyesinde bir seminer düzenlenecektir.

Bu seminer, kuruluşların kendi imkanları ile çözmekte güçlük çektikleri öncelikli mühendislik problemlerinin, üniversite'deki konu ile ilgili öğretim üyelerine sunulmasını amaçlamaktadır. Bu nedenle sanayi kuruluşlarındaki konu ile yakından ilgili, teknik ve yetkili elemanların problemleri mevcut tüm verileri ile sunulabileceği, tartışabileceği bir çalışma ortamı hazırlanacaktır. Bu seminer çalışması ilgili öğretim üyelerinin de bulunduğu konunun bütün ayrıntıları ve olası çözümleri ile tartışabileceği ÇALIŞMA GRUPLARINI da içerecektir.

Bu seminerde sunucular kuruluş temsilcileri, izleyiciler de öğretim üyeleri olacağı için başarıya ulaşılması her şeyden önce katılımcı kuruluşların

getirecekleri konu(lar) üzerindeki yapacakları hazırlığa bağlı olacaktır.

Yaratılacak olan çalışma ve tartışma ortamı ile Endüstrimizin mühendislik problemlerinin nasıl ve ne şekilde çözülebileceği açıklığa kavuşacaktır. Kurulacak olan ortak çalışma ilişkilerinin daha sonra karşılaşılabilecek problemlerin çözümünde de yararlı olması beklenmektedir.

Bu seminere katılmayı düşünen kuruluşların en geç **30 Kasım 1986** tarihine kadar aşağıdaki adrese başvurmaları gerekmektedir. Seminer tarihi daha sonra ilgili kuruluşlara iletilecektir. Bu seminere katılım ücretsiz olacaktır.

Başvuru Adresi:

MATİMAREN  
Endüstrimizin Özel Teknolojik Problemleri Semineri  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ  
ORTA DOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
06531-ANKARA

Tel: (41) 237100/2590



## 2. ULUSAL KIRILMA KONFERANSI

2. Ulusal Kırılma Konferansı, 1987 yılının Mayıs ayında Trabzon'da, Karadeniz Üniversitesi'nde yapılacaktır. Konferans, Karadeniz Üniversitesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'nun destekleriyle düzenlenmektedir.

Kırılmayı konu alan bir konferans ülkemizde ilk defa 1981 yılında Ankara'da Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde yapılmıştı. Bu konferansa sunulan 13 adet bildiri "1. Ulusal Kırılma Konferansı Bildirileri" başlığı altında basılmış ve dağıtımı sağlanmıştı. Türkiye'de başlangıçta yalnız üniversite ve araştırma kurumlarının ilgi alanı içinde görünen kırılma konusu, bugün endüstrimizin yakından izlediği bir uygulama alanına dönüşmektedir. Hafif alaşımlar başta olmak üzere yüksek dayançlı malzemelerin en büyük kullanıcısı olan havacılık endüstrisi ülkemizde kurulma aşamasını tamamlamak üzeredir. Yüksek dayanımlı hafif malzemeleri havacılık dışındaki sektörlerde kullanma eğilimi yurtdışında

olduğu gibi yurtiçinde de giderek artmaktadır.

Bu gelişmeler karşısında, kırılma olgusuna dayalı dizayn yaklaşımları, çatlaklı parçalar ve yapılarda ömür tayini, çatlakların tahribatsız kontrol teknikleri ile teşhisi ve izlenmeleri gibi konuların önemi daha da artmış bulunuyor. Özellikle bu aşamada, kırılma konusuna ilgi duyan çevreler arasında etkin bir bilgi ve deneyim iletişimi gerekli ve hatta zorunludur. 2. Ulusal Kırılma Konferansı'nın amacı, kırılma konusunda çalışma yapan kişi ve kuruluşları bir araya getirmek, böylece bilgi ve deneyim alışverişi yanında yakınlaşma ve işbirliği ortamını sağlamaktır.

2. Ulusal Kırılma Konferansı'nda aşağıdaki konular kapsanacaktır:

- Lineer elastik kırılma mekaniği ve uygulamaları,
- Elastik-plastik kırılma mekaniği ve uygulamaları,
- Sünek kırılma,
- Değişken yükler altında çatlak büyümesi,
- Çevresel koşulların çatlak büyüme kinetiğine etkisi,
- Hasara toleranslı yapılar analizi ve uygulamaları,
- Yüksek dayançlı alaşımlarda kırılma,
- Orta ve düşük dayançlı alaşımlarda kırılma,
- Kompozit malzemelerde kırılma,
- Çatlakların teşhisi ve izlenmeleri için tahribatsız kontrol yöntemleri.

Konferansa bildiri ile katılmak isteyenlerin 250 kelime ile sınırlayacakları bildiri özetlerini **30 Eylül 1986** tarihine kadar Prof.Dr. Mustafa DORUK, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü, Ankara, adresine göndermeleri beklenmektedir.

## KOROZYON DERNEĞİ KURULUŞ ÇALIŞMALARI

Ülkemizde Korozyon Derneği adı ile bir dernek kurmak için bir süreden beri yapılagelen çalışmalar ileri bir aşamaya ulaşmış bulunuyor. Yedisi üniversiteler ve onüçü kamu ve sanayi kesiminden toplam yirmi kurucu üye ile yola çıkacak bu derneğin ana amacı Türkiye'de korozyon bilimi, ve korozyonu teşhis ve önlemede izlenecek yaklaşımlar başta olmak üzere konuya olan ilginin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için çalışmalar yapmak şeklinde özetlenebilir. Bu amaçlar doğrultusunda derneğin aşağıda verilen alanlarda faaliyet göstermesi öngörülmektedir:

- a) Korozyon bilimi ve korozyon önleme usullerinin gelişmesini teşvik etmek, bunların yaygınlaşmasına çalışmak, korozyon önleme usullerinin uygulanması için gerekli teknolojinin gelişmesini sağlamak,
- b) Korozyon ve korozyonu önleme alanında eğitim ve öğretime yardımcı olmak,
- c) Korozyon ve korozyonu önleme konusunda sanayinin gereksindiği eğitim için olanaklar araştırmak ve bu konuda diğer kuruluşlarla işbirliği yapmak,
- d) Korozyon ve korozyonu önleme ile ilgili bilgi toplamak, ve bunları öncelikle uygulayıcıların gereksineceği biçimde, yaymak ve gereğinde başvurulacak bir kaynak olarak depolamak,
- e) Korozyon ve korozyonu önleme konusunda bilimsel toplantılar, konferanslar, kurslar, seminerler düzenlemek,
- f) Korozyon bilimi ve korozyonun önlenmesinde kullanılan usul, teknoloji, tesis ve malzemelerin tanıtılması için sergiler düzenlemek,
- g) Benzer amaçlarla kurulmuş ve kurulacak olan yurtiçi ve uluslararası diğer derneklerle, dernek amaçlarının gerçekleştirilmesine yönelik işbirliği yapmak.

Korozyon Derneğinin kuruluş çalışmalarını tamamlayarak 1987 yılı başında faaliyete geçmesi beklenmektedir.

Korozyon Derneği hakkında bilgi almak isteyenler

Prof.Dr.Mustafa Doruk,  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Metalurji Mühendisliği Bölümü  
06531 Ankara,

adresine başvurabilirler.

## YENİ ÜRÜNLER

**Türk Traktör Fabrikası**, bu yılın Haziran ayından itibaren 480, 480-S8 ve 640 model traktörlerin üretimine ilave olarak; 55-46,65-46 ve çift diferansiyelli 65-46 DT/ÇİFT ÇEKER modellerin üretimine başlamıştır. Piyasa talepleri paralelinde traktörlerin daha düşük hızda (en yüksek motor gücü devrinde 1-3 km/h) gerektiren işlerde de kullanılabilmesi amacıyla 8 vitesli standart 55 ve 65-46 modellerin 4 sürünge hız eklenmesiyle 12 vitesli türevleri de üretilebilecektir.

Yeni modellerin eski modellerden başlıca farklılıkları şunlardır:

- Yakıt deposu,
- Gaz ve motor durdurma kumanda donanımları,
- Susturucu ve radyatör,
- Ön ve ana hava süzgeçleri,
- Ön dingil ve ağırlıklar mesnetleri,
- Kuyruk mili kavraması kumanda donanımı,

- 55-46'lar için hız kutusu, ön tekerlekler ve hidrolik kaldırıcı,
- 65 - 46 DT'ler için canlı ön diferansiyel ve ön tekerlekler,
- Ön dingil,
- Direksiyon donanımı,
- Elektrik donanımı
- Gövde ve güvenlik çerçevesi,
- Ekipman bağlama düzeni,
- Sürücü oturağı

Türk Traktör Fabrikası'nda üretilen TÜRK-FIAT 55-46, 65-46 ve 65-46 DT model traktörler rahat kullanım ve kolay bakım özellikleriyle donatılmışlardır.

Güvenlik Çerçevesi, Ön Ağırlıklar Mesnedi, Arka Tekerlek Ağırlıkları ve Kasnak bulunan traktörlerin ana özellikleri aşağıda verilmektedir:

	55-46	65-46	65-46 DT
<b>BOYUTLAR (mm)</b>			
Max. uzunluk	3275	3520	3580
Max. genişlik	1780-2780	1830-2330	
Max. yükseklik	2320	2390	2395
İz genişlikleri Ön	1410-1810		1445-1875
Arka	1400-1900		
Dingil uzaklığı	2052	2203	2163
<b>AĞIRLIKLAR (kg)</b>			
Azami yüklü ağırlık	4000	4500	
Net boş ağırlık	1970	2270	2530
Güç/ağırlık oranı (BG/kg)	0.01375	0.01444	
<b>MOTOR</b>			
Tipi	Doğrudan püskürtmeli dizel 4 zamanlı		
Silindir sayısı	3	4	
Hacmi (cm <sup>3</sup> )	2710	3613	
Max. güç, BG(DIN)	55 (Motor:2600 d/d)	65 (Motor: 2400 d/d)	
Max. moment (kg-m)	16.5 (Motor:1500 d/d)	22 (Motor: 1500 d/d)	
Özgül yakıt tüketimi	171 (Motor:1600 d/d)	190 (Motor: 1400 d/d) (gr/BG h)	
Yakıt deposu hacmi	61 lt		
<b>AKTARMA</b>			
Kavrama	Kuru, çift plakalı, 11"		
En yüksek hız (km/h)	32	29	25
<b>LASTİKLER</b>			
Ön	6,00-16,6 kat	7,50-16,6 kat	11.2/10-24,6 kat
Arka	14,9/13-28,6"	16,9/14-30,6 "	16.9/14-30 "

	55-46	65-46	65-46 DT
<b>DİREKSİYON</b>			
Tipi	Mekanik kumandalı, sürekli bilya tipi		tam hidrolik
Min. dönüş çapı (m)	7,60	7,80	9,40
<b>FRENLER</b>			
Ayak freni Kuru bant tipi, mekanik, ayrı pedallar ile birlikte veya ayrı kumandalı			
El freni	Ayak frenine bağımlı, mekanik, el kolu ile kumandalı		
<b>KUYRUK MİLİ</b>			
Tipi	Tam bağımsız, 1 3/8" çapında 6 kamalı		
Standart devri	540 d/d (Motor: 1970 d/d)		
<b>KASNAK</b>			
Devri	1250 d/d (Motor: 2400 d/d)		
Kayış hızı	16.5 m/s (Motor: 2400 d/d)		
<b>HİDROLİK KALDIRICI</b>			
Tipi	Çeki ve durum kontrollü kapalı sistem		
Kaldırma kap (kg)	1920	1940	
3 nokta askı düzeni	1. ve 2. kategori		
Çeki düzeni	Ayarlanabilir, gezintili		
<b>GÖVDE</b>			
Tipi	Arkadan öne kalkabilir tip kaportalı; düz, takiyeli, yarı kapalı çamurluklu		
<b>ELEKTRİK DONANIMI</b>			
Gerilim	12 V		
Akü	105 Ah		
Marş motoru	3,5 kw		
Alternatör	400 W		
<b>SÜRÜCÜ KOLTUĞU</b>			
Tipi	İleri geri, yükseklik ve yaylanma ayarı yapılabilen lüks tip		

Bu sayfa tüm sanayi kuruluşlarına açıktır. Yayın/kurulunca uygun görüldüğü takdirde, yayın ilkelerini sağlayan ve kuruluşların yeni ürünlerini tanıtan yazıları ücretsiz olarak yayınlanacaktır.

# ODTÜ — MATİMAREN MAKİNA TASARIM VE İMALAT ARAŞTIRMA MERKEZİ

## KURULUŞ

Makina Tasarım ve İmalat Araştırma Merkezi (MATİMAREN) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü bünyesinde, Temmuz 1978 tarihinde kurulmuştur. Halen, makina mühendisliğinin çeşitli konularında uzmanlaşmış, çoğu doktora dereceli 30'a yakın araştırmacı, araştırma merkezinin çeşitli endüstri destekli projelerinde çalışmaktadır. Ayrıca araştırma yardımcısı olarak sözleşmeli personel de çalıştırılmaktadır. Merkez, çalışmalarını ODTÜ Döner Sermaye Yönetmeliği çerçevesinde yürütmektedir.

## KURULUŞ AMACI

MATİMAREN'in kuruluş amacı aşağıda belirtilen çalışma konularında Türkiye'nin bilimsel ve teknolojik gelişmesine, temel ve uygulamalı araştırmalar, geliştirme, projelendirme ve imalat yaparak katkıda bulunmaktır.

## ÇALIŞMA KONULARI

1. Mekanik sistem tasarımı ve makina tasarımı,
2. Prototip makina imalatı ve performans deneyleri,
3. Bilgisayar ile tasarım ve imalat (CAD/CAM) konularında sistem seçimi, yazılım geliştirme ve uygulama,
4. Bilgisayar yardımlı mühendislik uygulamaları,
5. Tasarım ve imalat ile ilgili fizibilite çalışmaları, işlem ve tezgah seçimi, fabrika projeleri,
6. İmalat planlaması ve fabrika organizasyonu,
7. İmalat ile ilgili takım, kalıp, mastar, jig ve bağlama kalıbı tasarımı, imalatı ve kontrolleri,
8. Kalite kontrolü ve kalite kontrol sistem tasarımı,
9. Makina tasarımı ve imalatı ile ilgili malzeme ve işlem deneyleri,
10. Mekanik sistemlerin teorik ve deneysel modellenmesi ve model analizi,
11. Bakım ve onarım konularında danışmanlık,
12. İşçi sağlığı ve iş güvenliği konusunda danışmanlık,
13. Yukarıdaki konularda seminer, konferans ve meslek içi eğitim vermek.

## BİTEN VE DEVAM EDEN PROJELER

MATİMAREN'in kuruluş aşamasında ve kuruluşundan bu yana bünyesinde tamamlanan ve devam eden proje çalışmaları aşağıda verilmiştir.

T.Zirai Donatım Kurumu Genel Müdürlüğü Ziraat Makinaları Fabrikaları Planlama ve İmalat Yöntemleri Seçimi Konularında Teknik Danışmanlık (**Türkiye Zirai Donatım Kurumu**)

Eskişehir Belediyesi Kalabak İçme Suyu Şişeleme Tesisleri Yıkama ve Doldurma Makinaları Tasarımı (**Eskişehir Belediyesi**)

Takım Tezgahları, Üretim Seçim, Bakım vb., Konularında Teknik Danışmanlık (**Hakan Teknik Ticaret**)

Döküm, Talaşlı İşlemler, Kalite Kontrolü ve Fabrika Organizasyonu Konularında Teknik Danışmanlık (**CER Döküm ve İmalat Sanayi**)

MKEK Çorum Sınai Tesisleri Teçhizatı İmal Fabrikasının Teknolojik Mühendislik Etüd ve Projelerinin Yapımı (**Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu**)

Manyetometre Sehpa Geliştirilmesi ve Prototip İmalatı (**Türkiye Petrolleri A.O.**)

Elazığ, Aşkale ve Afyon Çimento Fabrikaları İçin Çimento Hammaddesi Kurutucu Sistemi Tasarımı (**T.Çimento San.A.Ş.**)

MKEK Kırıkkale Sanayi Kuruluşları Atık Suları Arıtma Tesisleri, Teknik Danışmanlık (**Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu**)

ODTÜ Isı Santrali Kondens Suyu Filtre Tasarımı (**Orta Doğu Teknik Üniversitesi**)

Haşhaş Kapsülü Sıkıştırma Presi Tasarımı (**Toprak Mahsülleri Ofisi**)

Sondaj Borusu ve Sondaj Ağırlık Borularının Mekanik Özelliklerinin Tayini (**Türkiye Petrolleri A.O.**)



Seka Çaycuma Tesisleri İçin Döner Fırın Tipinde Pirit Kavurma Fırını Tasarımı ve İşletmeye Alınması (SEKA Çaycuma Müessesesi)

Model Uçak Motoru Tasarımı ve Prototip İmalatı (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Yangın Söndürme Motopompları Fizibilite Çalışması ve Prototip Ön Tasarımı (Deniz Kuvvetleri Komutanlığı)

Model Uçak Motoru Seri İmalat Araştırması (Türk Hava Kurumu)

TMO Tahıl Siloları Mekanik Uygulama Projeleri, Kontrol, Teknik Danışmanlık (Siloplanning/BMB)

Gezer Köprülü Vinç Kapasite Arttırma Projesi (Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu)

TPAO Merkezi Stok Kontrol Sisteminin İyileştirilmesi ve Bilgisayar Yardımı ile Stok Kontrol Sistemi Kurulması (Türkiye Petrolleri A.O.)(1983)

MAKSAM Malzeme Manipulasyonu (Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu)

Cebri Boru Konusunda Danışmanlık (GÜRİŞ A.Ş.)

MAKSAM Gürültü Kontrolü (Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu)

TPAO Kodlama, Kataloglama ve Merkezi Stok Kontrol Çalışması (Türkiye Petrolleri A. O.)(1984)

TPAO Makina Sicil ve Bakım Planlaması Çalışmaları (Türkiye Petrolleri A. O.)(1984)

Çelik Çekme Boru Fb. Gürültü Kontrolü ve Akustik Tasarımı (Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu)

TEK Gölbaşı Sosyal Tesisleri Pis Su Arıtma Ünitesi Oksidasyon Hendeği Mekanik Aksam Tasarımı (Bilge Mühendislik Müşavirlik A.Ş.)

Dişli Kutusu Tasarım Kontrolü (ASMAŞ A.Ş.)

Mekiksiz Dokuma Tezgahı Geliştirilmesi Konusunda Danışmanlık (Orhan BOZ Tekstil Ür. Pa. A.Ş.)

TPAO Kodlama, Katalog Yapma, Stok Kontrol ve Bilgisayar Çalışmaları (Türkiye Petrolleri A. O.)(1985)

TPAO Makina Parkı Sicil ve Bakım Planlaması (Türkiye Petrolleri A. O.)(1985)

Gürültü Kontrolü ve Akustik Tasarım (T.Ereğli Demir Çelik Fb. A.Ş.)

Karacaören Barajı ve HES Tesisleri İnşaatı İçin Danışmanlık (ANO İnşaat Ltd. Şti.)

Bursa Çöp Değerlendirme Etüdü (Bursa Belediyesi)

Kodlama,Katalog Yapma,Stok Kontrol ve Bilgisayar Çalışmaları (Türkiye Petrolleri A. O.)(1986)

TPAO Makina Parkı Planlı Bakım Çalışmaları (Türkiye Petrolleri A. O.)(1986)

BOTAŞ ITP Petrol Boru Hattı Pompalama İstasyonları Titreşim Ölçüm ve Analizleri (Boru Hatları ve Petrol Taşıma A.Ş.)

TAI Kimyasal İşlem Fb. Mekanik Aksam Danışmanlığı (Emek Holding A.Ş.)

---

---

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ  
BİLGİ ERİŞİM BİRİMİ

Özel teknolojik bilgi gereksiniminizi karşılamak için kurulmuştur. Olanaklar ölçüsünde Türkiye ve dünya çapında yayın tarama, yayın sağlama, yayın özetleme ve yönlendirme çalışmaları konunun uzmanı kişilerce yapılacaktır. Ücret, konu ve kapsam ile birlikte belirlenecektir.

---

---

## DERNEK ÜYELERİ

K. Sümeyir AKÇASU  
TÜBİTAK  
ANKARA

M. Haluk AKSEL  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

M.A.Sahir ARIKAN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Tuna BALKAN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Demir BAYKA  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Özdemir BENGİSU  
Dokuz Eylül Üniv.  
Mak.Müh.Böl.  
İZMİR

Ö. Gündüz BİLİR  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Ekrrem BÖLÜKBAŞ  
Çukurova İnş.Mak.San.A.Ş.  
MERSİN

Mehmet ÇALIŞKAN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Can ÇOĞUN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Haluk DARENDELİLER  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Mustafa DORUK  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Şükrü ER  
Işık Mak.San.A.Ş.  
ANKARA

O.Cahit ERALP  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Abdülkadir ERDEN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Nuh ERGENEMAN  
T.Traktör ve Zir.Mak.A.Ş.  
ANKARA

Hakkı ESKİCİOĞLU  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Hadi FEKE  
T.Şişe ve Cam Fab. A.Ş.  
İSTANBUL

Mustafa İ. GÖKLER  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Günay GÜNGEN  
MKEK  
ANKARA

Bilgin KAFTANOĞLU  
ODTÜ, Fen Bil. Enst.  
ANKARA

Macit KARABAY  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Birol KILKIŞ  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Mahmut C. MUCUOĞLU  
MEPA-RABAK A.Ş.  
İSTANBUL

Suha ORAL  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Kemal ÖZGÖREN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Ziya ÖZKAN  
BMC San. ve Tic.A.Ş.  
İZMİR

Bülent PLATİN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Ömer SAATÇIOĞLU  
ODTÜ, End.Müh.Böl.  
ANKARA

Arslan SANIR  
HEMA Dişli San. ve Tic.A.Ş.  
ANKARA

Nuri SARYAL  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Ergin TANBERK  
EMAS A.Ş.  
İSTANBUL

Muharrem TİMUÇİN  
ODTÜ, Met.Müh.Böl.  
ANKARA

Selçuk YAHSİ  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Cemil YAMALI  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Orhan YEŞİN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Tülay YEŞİN  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Birol YÜCEL  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Orhan YILDIRIM  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Hafit YÜNCÜ  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Taner GÜNEV  
KUTLUTAŞ  
ANKARA

M.Mustafa YILDIRIM  
Fırat Üniv. Tek.Eğt.Fak.  
Met.Eğt.Böl.  
ELAZIĞ

Asaf VAROL  
Fırat Üniv. Tek.Eğt.Fak.  
Mak.Eğt.Böl.  
ELAZIĞ

Tayyar BİGE  
ABANA, Elektromekanik  
San.ve Tic.A.Ş.  
KASTAMONU

Erman TEKKAYA  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Zeki ARIKAN  
ARIKAZAN A.Ş.  
ANKARA

İlhan KOÇOĞLU  
ERDEMİR  
KDZ. EREĞLİ

Ali Münir CERİT  
GAZ-KİMYA A.Ş.  
BURSA

Atom DAMALI  
ISKI  
İSTANBUL

Hüseyin SÖNMEZ  
Yıldız Üniv.  
Mak.Müh.Böl.  
İSTANBUL

Halit ÇELİKBUDAK  
Inst. für Thermische  
Stromungsmaschinen und  
Maschinenlaboratorium  
B. ALMANYA

Burhan BAYSAL  
LAYNE-BOWLER A.Ş.  
ANKARA

Attila M. DEMİRÖZ  
METİS A.Ş.  
İSTANBUL

Yücel GÜNAL  
GMS Ltd. Şti.  
İSTANBUL

Fikret AKTÜRK  
PANCAR Motor San.A.Ş.  
İSTANBUL

İsmail CÜRGÜL  
Y.Ü. Kocaeli Müh.Fak.  
Mak.Müh.Böl.  
İZMİT

M. Hilmi ÇOLAKOĞLU  
SEGEM  
ANKARA

Bedri TUÇ  
Erciyes Üniv. Müh.Fak.  
KAYSERİ

Ömer ANLAĞAN  
ANKARA

Mehmet KARABATUR  
POLAT RULMAN  
ANKARA

Özer DOĞANSOYSAL  
BURÇELİK A.Ş.  
BURSA

Ergin SUNGUR  
AKMOSAN A.Ş.  
ANKARA

Muammer ÖZDEMİR  
ANKARA

Adil OKYAY  
B. ALMANYA

Ferial Servet Arnas IŞIK  
ARGESA-LASSA  
KOCAELİ

N. Nabi EREN  
LASSA Lastik San.ve Tic.A.Ş.  
İZMİT

Suat TUNCEL  
TÜBİTAK  
KOCAELİ

Mehmet Baki KARAMIŞ  
Erciyes Üniv. Müh.Fak.  
Mak.Böl.  
KAYSERİ

Mücahit AKINCI  
MERT San.ve Tic.A.Ş.  
İSTANBUL

Naci ÖZERCAN  
ANKARA

Muhittin DÖKMECİ  
GÜRİŞ, Mak.ve Mon.A.Ş.  
ANKARA

Mehmet KASAP  
ÇİTOSAN T.A.Ş.  
ANKARA

Fevzi TORUN  
GÜRİŞ, Mak.ve Mon.A.Ş.  
ANKARA

Sarper ÖZDİL  
TÜPRAŞ  
BATMAN

Remziye BİLGİN  
ERDEMİR  
KDZ. EREĞLİ

Süleyman SARITAŞ  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
GAZİANTEP

Cevat BORÇBAKAN  
DERBY Lastik Fab.A.Ş.  
İSTANBUL

Murat SÖNMEZ  
ODTÜ, Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

İbrahim UZMAY  
Erciyes Üniv. Müh.Fak.  
KAYSERİ

Remzi TURAN  
ETERNİT San.A.Ş.  
KOCAELİ

Korkut ÖZOK  
ARÇELİK A.Ş.  
ESKİŞEHİR

Ercan ATAER  
Gazi Üniv., Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Veysel ÜNVERDİ  
901 nci Uçak Ana Depo  
ve Fab.Kom.  
ANKARA

Faruk ÇETİNKAYA  
MKEK, Silah ve Tüfek Fab.  
KIRIKKALE

Ömer H. SİNDEL  
PEMKO A.Ş.  
TEKİRDAĞ

Nazif DİNÇER  
Denizli Müh.Fak.  
DENİZLİ

Muharrem YILMAZ  
Y.Ü., Kocaeli Müh.Fak.  
KOCAELİ

Mehmet KURŞUNCU  
BORUSAN, Gemlik Boru Tes.A.Ş.  
BURSA

Murat TUĞRUL  
TEMSAN A.Ş.  
ANKARA

Mustafa TOLAY  
İTÜ, Kimya Müh.Böl.  
İSTANBUL

Ulvi Maksut GÜNAY  
T.Şişe ve Cam Fab.A.Ş.  
İSTANBUL

Erhan ALTAN  
Yıldız Üniv., Mak.Müh.Böl.  
İSTANBUL

Ahmet AKAY  
TEZSAN Pazarlama A.Ş.  
İSTANBUL

Erkan DOKUMACI  
DEÜ, Mak.Müh.Böl.  
İZMİR

Mehmet DURANSOY  
DURSAN Kazan ve Isı Cih.San.  
KONYA

Atilla BOZACI  
Karadeniz Üniv., Mak.Müh.Böl.  
TRABZON

Ali DÖNMEZ  
ERİŞ Teknik İzolasyon  
İZMİR

İbrahim SEVİM  
Yıldız Üniv., Mak.Müh.Böl.  
İZMİR

Cihat DOYRAN  
ETİBANK Bakır Pirit İşletmesi  
KASTAMONU

Şerafettin YÜKSEL  
Gazi Üniv., Mak.Müh.Böl.  
ANKARA

Ali H. AKBAŞ  
YAZAR A.Ş.  
ANKARA

T. Nejat VEZİROĞLU  
Univ. of Miami  
Clean Energy Research Inst.  
A.B.D.

Orhan ERSEN  
EMEK Holding A.Ş.  
ANKARA

Ferit Suat SERİNAN  
ERDEMİR  
KDZ. EREĞLİ

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİNİ  
ELEŞTİREN MEKTUPLARINIZI,  
DERGİDE YAYINLANAN MAKALELERLE  
İLGİLİ TARTIŞMA VE GÖRÜŞLERİNİZİ  
BEKLİYORUZ.

## YAYIN İLKELERİ

### Amaç

- Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
- Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
- Yayınlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
- Üniversite-endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
- Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

### Kapsam

a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayınlar;

Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile Tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.

b) Dergide yayınlanacak bildiriler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere Araştırma bildirileri, Uygulama bildirileri, Derleme bildirileri, Çeviri bildirileri ve Kısa bildiriler olabilir.

c) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

### Bildirilerin Değerlendirilmesi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, yayın kalitesi olarak belirli bir düzeyin üstünde kalmayı amaçlamıştır. Türkiye koşullarını da gözönüne alarak, bu kalite düzeyinin sürdürülmesi için gerekli tüm çaba ve titizlik gösterilecektir. Dergiye gelen

her bildiri kesinlikle incelemeden geçirilecek ve bu amaçla mümkün olduğu kadar Türkiye çapında ya da yurtdışında konunun uzmanı hakemler tarafından değerlendirilmesine özen gösterilecektir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları hakkında bildiri yazarlarına bilgi verilecektir.

### ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, MAKİNA TASARIM VE İMALAT (MATİM) DERNEĞİ'dir.

Derginin yönetimi ile ilgili "Dergi Danışma Kurulu" ve "Dergi Yayın Kurulu" olmak üzere iki organ vardır.

Dergi Danışma Kurulu olağan olarak yılda bir kez toplanır ve geçen yılın yayın politikasını belirler. Danışma Kurulu her yıl yeniden oluşturulur.

Dergi Yayın Kurulu, MATİM Derneği Yönetim Kurulu tarafından bir yıl süre ile seçilir. Yayın kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın kurulu faaliyetleri konusunda MATİM Derneği Yönetim Kuruluna bilgi verir onayını alır.

### REKLAM İLKELERİ

Derginin arka kapaktan önceki birkaç sayfası reklam amacı ile firma ve kuruluşlara satılmak üzere ayrılır. Bu sayfalarda alınacak reklamlar aşağıdaki ilkeleri sağlamalıdır.

- Firmanın kendisini teknolojik, personel, ekonomik vb., açıdan tanıtan, ürünlerini ve ürünlerinin uygulama alanlarını belirten, firmanın uzmanlık konularını vurgulayan yazılar.
- Firma tarafından geliştirilen yeni bir ürün ya da teknolojiyi tanıtan yazılar.
- Makina tasarım ve imalatında kullanılacak ve firmaya özgü cetvel, abak, resim vb., bilgiler.

Yukarıda belirtilen ilkeler içinde hazırlanan reklam yazıları, yayın kurulu tarafından incelenir ve dergi yayın kalitesine uygun bulunursa basılır. Yayın kurulu gerekli gördüğü durumlarda düzeltme önerileri getirilebilir.

# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Journal of Mechanical Design and Production is a quarterly periodical, published by the Turkish Mechanical Design and Production Society, METU, Ankara, Turkey. It is one of the society's aims, to publish qualified research and review papers in Turkish. The published papers are strictly refereed to maintain a high scientific and engineering level at international standards.

## MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisine yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayınlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kaosa için de olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi yayın kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilecek ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazarına bildirilecektir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayınlanabilir.

- 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 yayınlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.

## 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.

### Makalelerin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

- Makalenin adı
- Yazar(lar) ad(lar), ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il
- Özet (Türkçe ve İngilizce)
- Makalenin ana kısmı
- Teşekkür (gerekli ise)
- 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 fakat 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 İngilizcesi de Türkçe özetten sonra 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 Bağlantılar

Matematiksel bağlantılar, daktilo ile veya elle anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterlerin sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazı ile belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle daktilo

kullanımında "1" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "0" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağlantılar 1 (bir) den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşitliğin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "()" içinde verilmelidir.

### Birimler

Zorunlu olmadıkça sadece S.I. birimleri kullanılmalıdır. S.I. dışında birim kullanıldığında, fiziksel büyüklüğün S.I. eşdeğeri ve birimi parantez içinde verilmelidir.

### Şekiller ve Çizelgeler

Şekiller küçültme ve basımda sorun yaratmamak için siyah mürekkep ile, düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında aydınlar veya beyaz bir kağıda çizilmelidir. Her şekil A4 boyutunda ayrı bir sayfada olmalı, şekil genişliği 80 mm'den ufak olmalıdır. Şekiller 1 (bir) den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şeklin altına alt yazılarıyla birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir) den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

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 <sup>1</sup> ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

### Resimler

Makalenin bütünlüğü için kesin gerekli olmadıkça resim kullanılmamalıdır. Kullanılması mutlaka gerekiyorsa, resimler parlak sert (yüksek kontrastlı) fotoğraf kağıdına basılmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Özel koşullarda renkli resim baskısı yapılabilecektir.

### Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [] içinde verilmelidir. Dergilerde yayınlanan 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, **Trans. 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 Joints** AAR Technical Center, Technical Report, No. R-462, October 1980.

### Kongre Makalesi

4. Adalı, E. ve Tunali, F. Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş 1 Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı, 287-293, ODTU, 1984.

### Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Makaleler yaklaşık 4000 kelimeyi ve 10 adet şekli ve çizelgeyi aşmayacak şekilde hazırlanmalıdır. 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.

Yayınlanın veya yayınlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yayınlanan makalelerden 20 adet ücretsiz kopya sadece ilk yazara gönderilir. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çeviriden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

### YAYIN HAKKI

Dergide yayınlanan makalelerin her türlü yaygın hakkı Makina Tasarım ve İmalat Derneği'ne aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayınlanamaz ve çoğaltılamaz.

### YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.

### 1. Örnek dip notu