

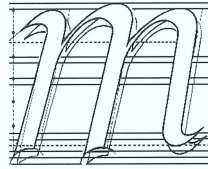
ISSN 1302-9487

# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt : 11

Sayı : 1

Mayıs 2009



*matim*

Makina Mühendisliği Bölümü  
ODTÜ - ANKARA

## Sahibi

Makina Tasarım ve İmalat Derneği adına Yönetim Kurulu Başkanı  
Bilgin KAFTANOĞLU

ODTÜ

## Yayın Kurulu

Metin AKKÖK  
Can ÇOĞUN  
İlhan KONUKSEVEN (Sorumlu Yayın Yönetmeni)

ODTÜ  
Gazi Ü  
ODTÜ

## Danışma Kurulu

M.A. Sahir ARIKAN  
Tuna BALKAN  
Erhan BUDAK  
Serkan DAĞ  
Melik DÖLEN  
Hüseyin FİLİZ  
Necdet GEREN  
Mustafa İ. GÖKLER  
Erk İNGER  
Haydar LİVATYALI  
Ferruh ÖZTÜRK  
Levend PARNAS  
O. Selçuk YAHŞI  
Yiğit YAZICIOĞLU  
Orhan YILDIRIM

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

## Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

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

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

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

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



# MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 11 Sayı: 1 Mayıs 2009

JOURNAL OF  
MECHANICAL DESIGN  
AND PRODUCTION

Vol: 11 No: 1 May. 2009

ISSN 1302-9487

## TELİF HAKKI

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

## ABONE KOŞULLARI

Yıllık abone bedeli 2006 yılı içinde gerçek kişiler için 6 YTL, firma ve kuruluşlar için 30 YTL, öğrenciler için 3. YTL'dir. Abone olmak için aşağıda verilen banka hesabına abone bedelinin yatırılması ve açık adresiniz ile banka makbuzunun adresimize gönderilmesi yeterlidir.

## TANITIM KOŞULLARI

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

## BANKA HESAP NUMARASI

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

## DİZGİ

Hülya SEVER

## BASKI

ODTÜ Basım İşliği

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

## İÇİNDEKİLER

### ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Birincil İmalat Proseslerinin Seçiminde Kullanılacak  
Bir Karar Destek Sisteminin Geliştirilmesi 1

**Mustafa Yurdakul**  
**Emre Arslan**  
**Yusuf Tansel İç**

Bor Nitrit Kaplamaların Çelik Alt Malzemeler Üzerinde  
RF Magnetron Saçtırma Yöntemiyle Büyütülmesi 15

**H. Cesur**  
**B. Kaftanoğlu**  
**A. Kalkanlı**  
**B. Oral**

İleri Kompozit Malzemelerin Reçine Transfer Kalıplama  
Yöntemiyle Üretiminde Kalıp İçi Reçine Akışının  
Modellenmesi 22

**Merve Erdal**  
**Hakan İpek**  
**Hatice Sinem Şaş**

FDM (Fused Deposition Modeling)  
Yöntemi ile Çalışan Hızlı Prototip Cihazlarında Kullanılan  
ABS Filament telin Üretilmesi Çalışması 34

**Bülent Ekici**  
**Hüseyin Yaltırık**

DP800 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin ve Geri Esneme  
Davranışının İncelenmesi 40

**Süleyman Kılıç**  
**Fahrettin Öztürk**  
**Serkan Toros**

Kitap Tanıtımı 46

Sayın Okurlarımız,

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

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

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

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

**Mustafa Yurdakul**  
Doç.Dr.

Makine Mühendisliği Bölümü,  
Gazi Üniversitesi, Ankara.

**Emre Arslan**  
Mak. Yük. Müh.

Etimesgut Belediyesi, Ankara

**Yusuf Tansel İç**  
Öğr. Gör. Dr.

Endüstri Mühendisliği Bölümü,  
Başkent Üniversitesi, Ankara.

## Birincil İmalat Proseslerinin Seçiminde Kullanılacak Bir Karar Destek Sisteminin Geliştirilmesi

*Günümüzde imalat sanayinde kullanılan proseslerin sayısı ve yetenekleri oldukça artmıştır. Bu artışların bir sonucu olarak da prosesler arasında en uygun olanını seçme işinin insan tecrübesi yerine sistematik bir şekilde yapılma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu makalede birincil imalat proseslerinin seçiminde kullanılacak bir karar destek sistemi (PROSEÇ) geliştirilmiştir. Visual Studio 2008' de geliştirilen PROSEÇ; malzeme, yıllık üretim miktarı, şekil tipi, parça kalınlığı gibi parça özelliklerini kullanarak aday prosesleri belirler ve kalan aday prosesler arasında yaptığı maliyet analizi ile en düşük üretim maliyetine sahip aday süreci kullanıcıya önerir. Çok sayıda pratik uygulama ile test edilen PROSEÇ genellikle pratikte kullanılan süreci veya daha ekonomik olan başka bir aday süreci önermiştir. Kullanımı kolay ve geliştirmeye açık bir yapıya sahip PROSEÇ in kullanıcılar tarafından en faydalı bulunan özelliği ise proses seçiminde yaygın ve tanınan proseslerin yerine daha az bilinen ama daha ekonomik olanları önermesi olmuştur.*

*Anahtar Kelimeler: İmalat prosesleri, Karar destek sistemi, Birincil imalat proseslerinin seçimi.*

### 1. GİRİŞ

Birincil imalat prosesleri parçaya tasarımda verilen nihai şeklini kazandırmak için gerçekleştirilen şekillendirme proseslerini kapsar [1]. Birincil imalat prosesleri literatürde yedi ayrı kategoride sınıflandırılmaktadır [2,3]: 1) Döküm, 2) Kalıplama, 3) Toz Metalürjisi, 4) Plastik Şekillendirme, 5) Talaşlı İmalat, 6) Kompozit şekillendirme ve 7) Buhar Biriktirme. Ancak bu çalışmada esas olarak herhangi bir ikincil prosese ihtiyaç olmadan tek bir birincil prosesle parçanın son şeklinin ve özelliklerinin kazandırıldığı kabul edilmiştir. Birincil imalat proseslerine ilişkin literatür incelendiğinde, tek bir birincil prosesin uygulanmasıyla bir imalat işlemi için yeterli düzeyde tüm tasarım beklentilerinin karşılanabileceği belirtilmektedir [1]. Bu çalışmada sadece birincil imalat proseslerinin seçimine yönelik bir karar destek sistemi geliştirilmiştir.

Bir parçanın şekillendirmesi için gerekli birincil prosesinin seçimi, ölçüler, şekil, kalınlık, toleranslar, malzeme, üretim miktarı gibi pek çok farklı faktörün dikkate alınması gereken karmaşık bir

zorlaştrın önemli bir unsurdur [5]. Bir parçayı üretilebilecek proseslerin çokluğu nedeniyle, literatürde birincil imalat proseslerinin seçimi, belirli kriterleri sağlamayan prosesleri elemek suretiyle işe uygun proseslerin belirlenme işlemi olarak tanımlanmaktadır [6]. Literatürde, Bilgisayar Destekli Malzeme ve Proses Seçimi [7], Tasarım Danışmanı [8], Malzeme ve Proses Seçimi [9,10], Cambridge Proses Seçici [11,12], ve İmalat Danışman Sistemi [1,13] gibi birincil imalat proseslerinin seçiminde kullanılacak tarzda çalışmalara rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda geliştirilen karar destek sistemlerinin ilk adımında, bir veri giriş ekranından kullanıcıya sorular yöneltilmektedir. Sorulara kullanıcı tarafından verilen yanıtlar, veri tabanında bulunan proseslerin karakteristikleri ile karşılaştırılarak uygun prosesler liste halinde ekranda sıralanmaktadır [4,7-8]. İkinci adımda ise ilk aşamada elde edilen prosesler, karar destek sistemi içinde yer alan çok kriterli karar verme modeline [4, 9-10], maliyet analizi modeline [3,6,11] veya bu modellerin her ikisini kapsayan bir başka modele [1,7,14] aktarılmaktadır. Prosesler bu modellerde gerçekleştiren işlemlerin sonucuna göre en iyiden en kötüye doğru sıralanmaktadır. Eğer karar

destek sistemi bu tür modellere sahip değilse sıralama yapılmaksızın ilk adım sonunda işlem sona erdirilmektedir [8,12-13]. Bu çalışmalar hakkında daha detaylı bilgiler [1,4,14] numaralı kaynaklarda bulunmaktadır. Djassemi [6], yukarıda belirtilen çalışmalar içerisinde Cambridge Proses Seçim Modülü'nün (CPSM) birincil imalat proses seçimi alanında ticari olarak satılan ve kolaylıkla elde edilebilecek tek yazılım olduğunu belirtmektedir. Ayrıca Djassemi [6], CPSM'nin literatürde bulunan ve yukarıda belirtilen çalışmalardan farklı olarak metal, polimer, seramik ve kompozit malzemelere ilişkin verileri bünyesinde barındırdığını, programın malzeme seçiminin yanı sıra proses seçimini de gerçekleştirilebildiğini belirtmektedir. CPSM'nin seçtiği prosesler metal şekillendirme proseslerini kapsamaktadır [6].

Literatür taraması sonucunda mevcut çalışmaların bir kısmının özel proseslere inmeden sadece genel proses seçimine (döküm, talaşlı imalat, dövme, ekstrüzyon) odaklanmış çalışmalar olduğu [13] görülmektedir. Diğer bir kısım çalışma ise, tüm imalat proseslerini kapsamaya çalışmakla birlikte, parçanın tasarım bilgilerine yer vermeden sadece yapılacak üretimin parti sayısı, parça boyutları, üretimin otomasyona uygunluğu, kullanılacak malzeme, ürün kalitesi ve maliyet değerlendirmesi gibi genel özelliklere göre değerlendirme yapmaktadır [6,9,10,14]. Ayrıca bu gruptaki çalışmalar alternatif prosesleri çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanarak puanlandırmakta ve alternatifleri sıralamaktadır. Başka bir kısım çalışma ise; delme, tornalama, frezeleme gibi talaşlı imalat ikincil proseslerle birlikte kum kalıba döküm, basınçlı döküm, metal kesme ve ekstrüzyon gibi bazı birincil prosesleri önermekte ve sadece kullanılacak malzemeye uygun prosesleri seçmektedir [1,4]. Bu iki grubun dışında diğer bir kısım çalışma ise, ağırlıklı olarak maliyet analizine odaklanan proses seçim çalışmalarıdır [3,7,11]. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, yoğun kullanımı olan tüm birincil proseslerin kapsadığı bir karar destek sistemi geliştirilmiştir. Ayrıca bu çalışma ile literatürde farklı kaynaklarda bulunan birincil proseslere ilişkin dağınık durumdaki bilgiler bir arada toplanarak, seçim işleminde kullanılacak akış şemaları oluşturulmuştur. Diğer taraftan her birincil proses için farklı değerlendirmelere sahip olan maliyet faktörleri de bir karar destek sistemi içerisinde bütünleştirilmiştir. Böylece proses kabiliyetlerini tasarım unsurları çerçevesinde sorgulayan ve maliyet analizi de gerçekleştiren bir birincil imalat süreci seçimi karar destek sistemi (PROSEÇ) oluşturulmuştur.

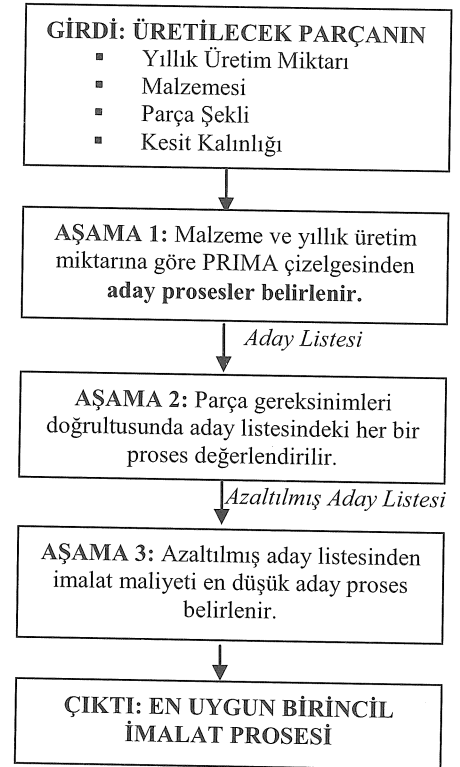
Geliştirilen karar destek sistemi, imalat sanayinde üreticiler tarafından kolaylıkla kullanılabilir ve sonuç elde edilebilecek bir yapıda

geliştirilmiştir. PROSEÇ geliştirildikten sonra, Ankara'daki çeşitli imalat firmalarında başarıyla test edilmiştir. Makalenin dördüncü bölümünde programın testine yönelik olarak yapılan iki adet uygulamaya ve uygulamalar sonucunda elde edilen başarılı sonuçlara ilişkin yorumlara yer verilmektedir.

## 2. PROSEÇ KARAR DESTEK SİSTEMİNİN OLUŞTURULMASI

PROSEÇ seçim programını geliştirebilmek için gerekli olan akış şemalarının geliştirilmesine yönelik olarak Şekil 1 de verilen ve üç aşamadan oluşan bir seçim akış yaklaşımı geliştirilmiştir. İlk iki aşama, parçayı üretebilecek aday proseslerin tespit edilmesine yöneliktir. Son aşamada ise aday prosesler arasında maliyet analizi yapılarak en düşük maliyetli olanı seçilir ve çıktı olarak kullanıcıya sunulur.

İlk aşamadaki eleme işlemi PRIMA çizelgesi (Çizelge 1) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. PRIMA çizelgesi sadece parçanın malzeme ve yıllık üretim miktarını kullanır ve geniş bir aday listesi sunar. İkinci aşamada ise parçanın şekli, kesit kalınlığı ve yüzey kalitesi gibi değerleri kullanılarak aday listesinden daha dar kapsamlı azaltılmış bir aday listesi elde edilir. Bu aşamada parçanın gereksinimleri ile birincil imalat proseslerin kabiliyetleri karşılaştırılır.



Şekil 1. PROSEÇ akış şeması

Çizelge 1. Birincil imalat prosesleri seçim matrisi- PRIMA (PROCESS INFORMATION MAPS) [15]

Mazeme Üretim Miktarı	Demir		Karbon Çelikleri		Alaşım-Takım çelikleri		Paslanmaz Çelikler		Bakır ve alaşımları		Alüminyum ve alaşımları		Magnezyum ve alaşımları		Çinko ve Alaşımları		Kalay ve alaşımları		Kuruşun ve alaşımları	
	[1.5] [1.6] [1.7] [4.M]	[1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [5.6] [5.7]	[1.1] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.5] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.6] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.7] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M]
Çok Düşük 1 -100	[1.2] [1.5] [1.6] [1.7] [4.M]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.3] [5.4]	[1.1] [1.2] [1.7] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.6] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M]
Düşük 100 - 1.000	[1.2] [1.5] [1.6] [1.7] [4.M]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.3] [5.4]	[1.1] [1.2] [1.7] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.6] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M]	[1.1] [1.8] [3.10] [4.M]	
Düşük-Orta Arası 1.000 - 10.000	[1.2] [1.3] [1.5] [1.6] [1.7]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[3.11] [4.A] [5.2]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.3] [1.6] [1.8] [3.10] [4.A]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	
Orta-Yüksek Arası 10.000 - 100.000	[1.2] [1.3] [3.11] [4.A]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[3.11] [4.A] [5.2]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.3] [1.6] [1.8] [3.10] [4.A]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	
Yüksek 100.000+	[1.2] [1.3] [3.11] [4.A]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[3.11] [4.A] [5.2]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.1] [5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.2] [1.5] [1.7] [3.7] [3.10] [4.M]	[5.3] [5.4] [5.5] [4.M]	[1.3] [1.6] [1.8] [3.10] [4.A]	[5.1] [5.5] [3.10] [4.M]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	[1.3] [1.8] [3.10] [4.A]	
Tüm Miktarlar	[1.1] [1.6] [3.6]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]	[3.8] [3.9]	[1.1] [1.6] [3.6]

[1.1] Kum Kalıba Döküm; [1.2] Kabuk Döküm; [1.3] Yarıçaplı Kalıba Döküm; [1.4] Basınçlı Kalıba Döküm; [1.5] Savurma Döküm; [1.6] Hassas Döküm; [1.7] Seramik Kalıba Döküm; [1.8] Plastik Kalıba Döküm; [1.9] Sıkıştırma Döküm.

[3.1] Kapalı Kalıba Döme; [3.10] Spindle; [3.11] Toz Metalürjisi; [3.12] Sürekli Ekstrüzyon (Metal); [3.2] Haddelenme; [3.3] Çekirme; [3.4] Soğuk Şekillendirme; [3.5] Baş Yapma; [3.6] Döner Kalıba Döme; [3.7] Süper-Plastik Şekillendirme; [3.8] Sac-Metal Kesme; [3.9] Sac-Metal Şekillendirme; [4.A] Otomatik İşleme; [4.M] Manüel İşleme.

[5.1] Elektro-Erozyon ile İşleme; [5.2] Elektro-Kimyasal İşleme; [5.3] Elektro-Işım ile İşleme; [5.4] Lazer ile İşleme; [5.5] Kimyasal İşleme; [5.6] Ultrasonik İşleme; [5.7] Aşındırıcı Jet ile İşleme.



Çizelge 2 bazı birincil imalat proseslerinin kabiliyetlerini göstermektedir. Bu çizelgede kullanılan şekil sınıflandırması ise Şekil 2' de verilmiştir. Şekil 2'de, şekil sınıflandırma işlemi ilk olarak parçanın geometrisi ve ardından karmaşıklığına uygun olarak yapılmaktadır. Parça geometrisi dairesel, silindirik, prizmatik, açık-yarı-açık kesitli, tüp, düzlem, ince ve küresel olmak üzere gruplara ayrılmaktadır. Ardından tüm bu gruplar basitten en karmaşığa doğru sınıflandırılmaktadır. Karmaşıklık sınıflaması ise; parçanın düzgün kesit, parçanın sonunda değişen kesit, merkezde değişen kesit, eğriliğe sahip kesit, bir tarafı kapalı, iki tarafı kapalı, aykırı ve karmaşık olmasına göre yapılmıştır.

Son aşamada ise 2. Aşamada elde edilen azaltılmış aday listesinde yer alan prosesler arasından en ekonomik üretimi gerçekleştirecek olan prosesin seçimi yapılmaktadır. Her bir aday prosesin parça üretim maliyeti Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır [15]. Eşitlik 1'de gerekli tüm değerler Swift ve Booker'ın [15] çalışmasında grafik veya çizelge şeklinde sunulmaktadır. Eşitlik 1'de ilk kısım ( $V \cdot C_{mt}$ ) prosese göre değişiklik göstermeyen ürünün hammadde maliyetini, ikinci kısım ( $P_c \cdot C_{mp} \cdot C_c \cdot C_s \cdot C_f$ ) ise aday proseslere göre değişen üretim maliyetini temsil etmektedir. Üretim maliyeti prosesin kaba maliyetinin malzemenin prosese uygunluğu, parça şeklinin karmaşıklığı, kesit kalınlığı ve yüzey kalitesi katsayıları ile çarpılması sonucu edilir.

$$M_f = V \cdot C_{mt} + P_c \cdot C_{mp} \cdot C_c \cdot C_s \cdot C_f \quad (1)$$


Eşitlikte; V: Parça üretimi için gereken gerekli malzemenin kaba hacmi,  $C_{mt}$ : Hammaddenin birim hacminin satın alma maliyeti,  $P_c$ : Prosesin kaba maliyeti,  $C_{mp}$ : Malzemenin prosese uygunluğu katsayısı,  $C_c$ : Parça şeklinin karmaşıklığı katsayısı,  $C_s$ : Kesit kalınlığı katsayısı,  $C_f$ : Yüzey kalitesi katsayısını ifade etmektedir.


## 2. 1. PROSEÇ Akış Şemalarının Oluşturulması

Geliştirilen seçim yaklaşımı kullanılarak her bir farklı malzeme ve üretim miktarı için (1-100, 100-1.000, 1.000-10.000, 10.000-100.000 ve 100.000 üzeri) akış şemaları geliştirilmiştir. Şekil 3'te örnek olarak demir bir malzemeden yıllık 1-100 arasında üretilecek bir ürün için birincil proses seçiminde kullanılacak akış şeması verilmektedir. Proses seçimi için oluşturulan seçim akış şemaları Visual Studio 2008 yazılım programına aktarılmış ve seçim işlemini

gerçekleştiren PROSEÇ karar destek sistemi oluşturulmuştur.

## 3. PROSEÇ'İN KULLANIMI

Program çalıştırıldığında Şekil 4 (a)'da verilen üretilecek ürün ile ilgili tasarım ve pazar araştırmasından elde edilen değerlerin girildiği pencere ekrana gelir. Açılan pencerede sırasıyla malzeme, yıllık üretim miktarı, parça ağırlığı, kesit kalınlığı, parça şekli, yüzey kalitesi ve maliyet parça şekli değerlerini girmek için araç çubukları vardır. Malzeme araç çubuğu demir, karbon çelikleri, alaşım çelikleri ve paslanmaz çelik malzemelerini içerir. Pencerede yıllık üretim miktarı, parça ağırlığı ve yüzey kalitesi kısımlarına ürüne ait değerler rakam olarak girilir. Kesit kalınlığı, parça şekli ve maliyet parça şekli kısımları ise aktif değildir ve kutuların sağındaki  butonuna basıldığında açıklama pencereleri görüntülenir.

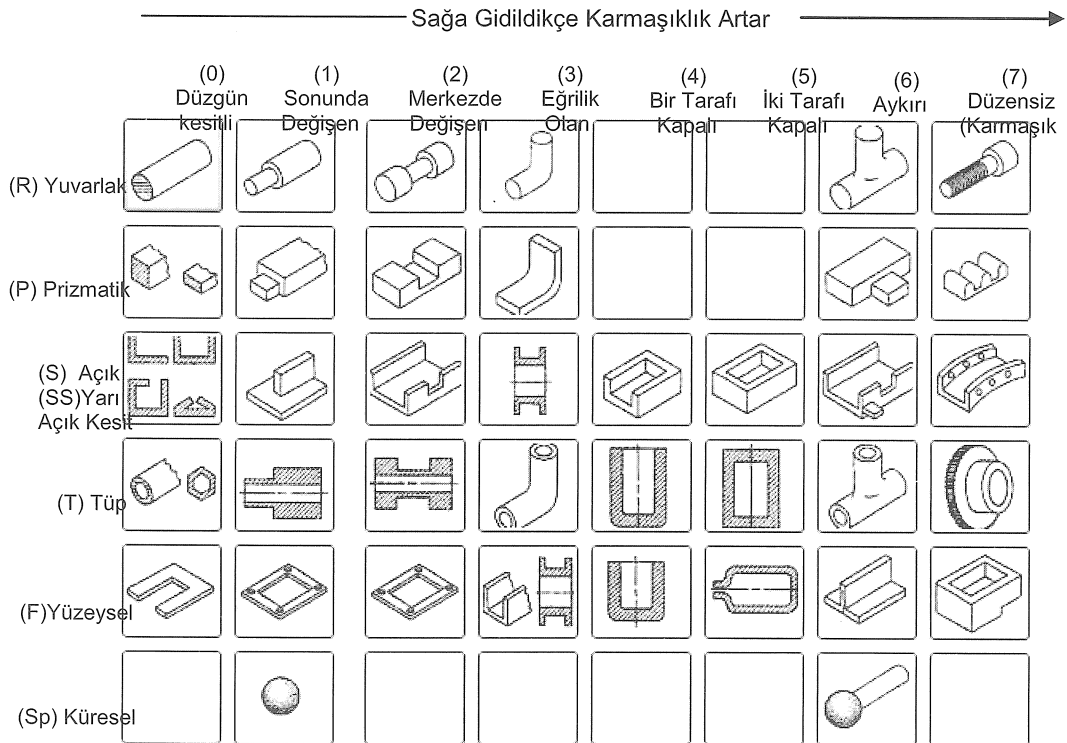
Kesit kalınlığı için açıklama penceresi Şekil 4 (b)'de verilmiştir. Açılan yeni pencerede kesit kalınlığı değeri girildikten sonra program başlangıç penceresine KAPAT butonuna basılarak dönlülür. Kesit kalınlığından sonra tekrar Parça Şekli ve Maliyet Parça Şekli verilerinin girilmesi için yanlarındaki  butonlarına basılması gerekmektedir.

Parça Şekli butonuna basıldığında Şekil 2'de verilen ve program içinde yeniden düzenlenen parça şekilleri ekrana gelir [17]. Kullanıcı parça şekli sınıflaması penceresinde üretilecek ürünün ait olduğu sınıflamaya ait butona basarak seçimini yapar. Butona basılması ile Parça Şekli Sınıflandırması penceresi otomatik olarak kapanır ve program başlangıç penceresine geri döner. Maliyet Parça Şekli butonu ise, ürün maliyetinin hesaplanmasında gerekli olan parça şekli karmaşıklığı katsayısının hesaplanmasında gerekli olan maliyet parça şekil karmaşıklığı penceresini açar (Şekil 5). Kullanıcının ürünün sınıflandırmasını seçmesi ile ilgili katsayı direkt olarak program tarafından hesaplanır ve ürün maliyetinin hesaplanmasında kullanılır. PROSEÇ'te tüm değerler girildikten sonra "Seçilen Proses" butonuna basıldığında program tarafından belirlenen uygun prosesler maliyetlerine göre sıralı olarak ekrana gelir. Program ilk sıradaki prosesi en düşük maliyetli olduğu için önerir. İstenirse proses tanıtım bilgisine ekrandaki "Proses Bilgisi" butonuna basılarak ulaşılabilir.

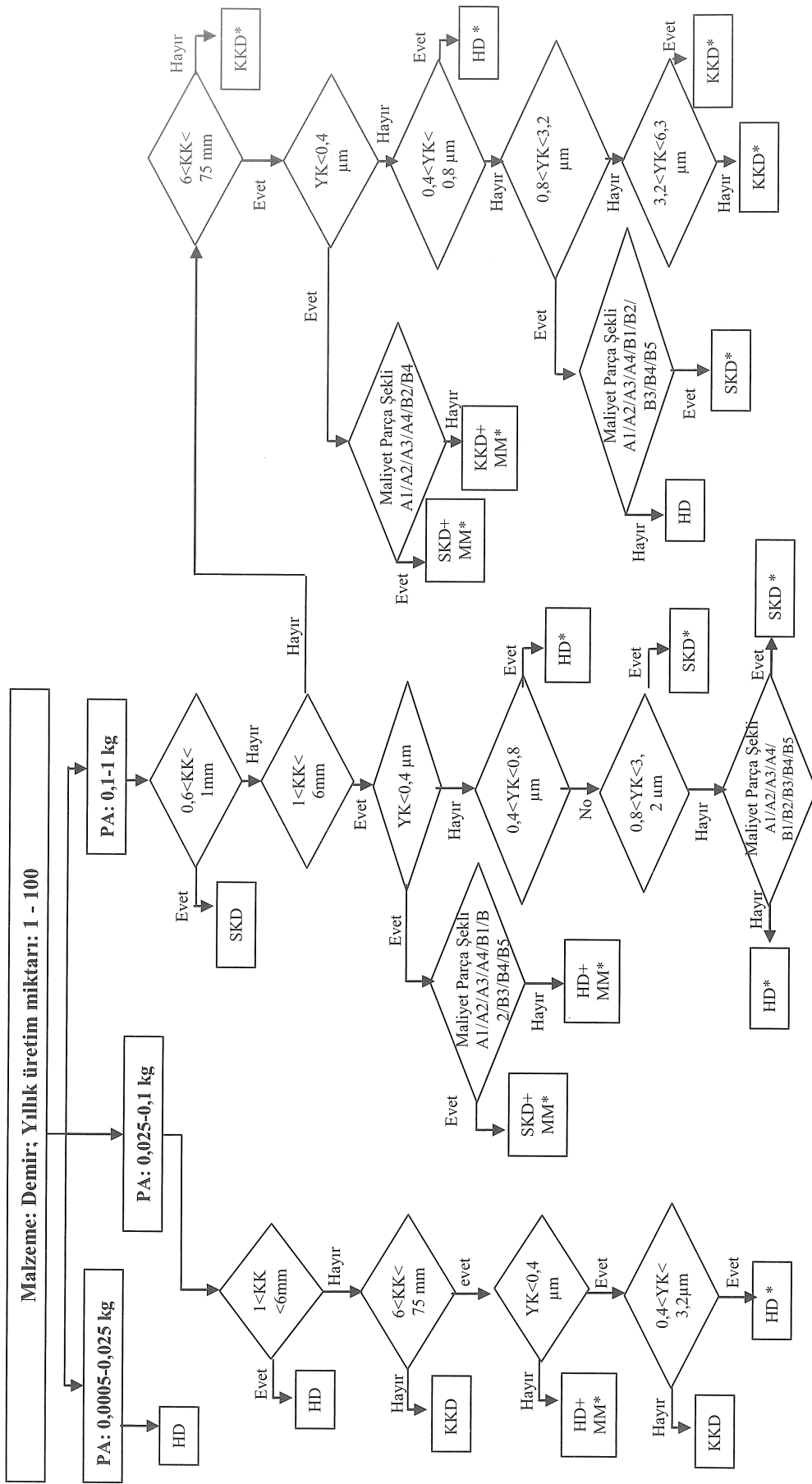
Çizelge 2. Bazı birincil imalat proseslerinin kabiliyet sınırları [15,16]

PROSES	Ağırlık (kg)	Şekil*	Kesit Kalınlığı (mm)		Yüzey Kalitesi (µm)
			Min.	Mak.	
Kum Kalıba Döküm (KKD)	0,025-Sınırsız	Bütün Şekiller	6	Sınırsız	3,2-25
Kabuk Döküm (KD)	0,01-20	Bütün Şekiller	1,5	50	0,8-6,3
Yerçekimsel Kılavuz Döküm (YKD)	0,05-5	T3/5,F5 dışında diğer şekiller	2	50	0,8-6,3
Savurma Döküm (SD)	1-5.000	T0/1/2/7	25	125	1,6-12,5
Hassas Döküm (HD)	0,0005-5	Bütün Şekiller	1	75	0,4-3,2
Seramik Kalıba Döküm (SKD)	0,1-50	Bütün Şekiller	0,6	75	0,8-6,3
Sıkıştırma Döküm (SıD)	0,025-4,5	Bütün Şekiller	6	200	1,6-12,5
Kapalı Kalıpta Dövme (KaKD)	0,01-100	R,P,S-SS, T1/4,Sp	0,1	Sınırsız	1,6-25
Sıcak Haddelme (SıHAD)	10-1.000	R0/P0/T0	1,6	1000	6,3-50
Soğuk Haddelme (SHAD)	10-1.000	R0/P0/T0	0,0025	200	0,2-6,3
Çektirme (ÇEK)	10-1.000	R0/P0/S0/T0	0,1	25	0,2-0,8
Soğuk Şekillendirme (SŞ)	-	R,P,S-SS, T1/4,Sp	0,09	Sınırsız	0,1-1,6
Döner Kalıpta Dövme (DKD)	-	R0/P0/S0/T0	2,5	50	0,8-6,3
Toz Metalürjisi (TM)	0,01-15	Bütün Şekiller	1,5	6	0,2-3,2
Soğuk Ekstrüzyon (SEK)	1-5.000	R,P,S-SS, T1/4,Sp	3	Sınırsız	0,4-3,2
Sıcak Ekstrüzyon (SİEK)	1-5.000	R,P,S-SS, T1/4,Sp	3	Sınırsız	1,0-25

\* Şekil 2'den alınmıştır



Şekil 2. Parça Şekli Sınıflandırması [16]



PA: Parça Ağırlığı, KK: Kesit Kalınlığı, YK: Yüzeysel Kalitesi, HD: Hassas Döküm, HD+: Hassas Döküm, SKD: Seramik Kalıba Döküm, SKD+: Seramik Kalıba Döküm, MM: Mantel İşlem, (\*) Maliyet Analizi.

Şekil 3. Demir malzeme ve üretim miktarı 1-100 adet için oluşturulan birincil proses seçimi akış şeması.

**Seçim Kriterleri**

Malzeme

Yıllık Üretim Miktarı  
 Adet

Parça Ağırlığı  
 kg

Kesit Kalınlığı  
 ...

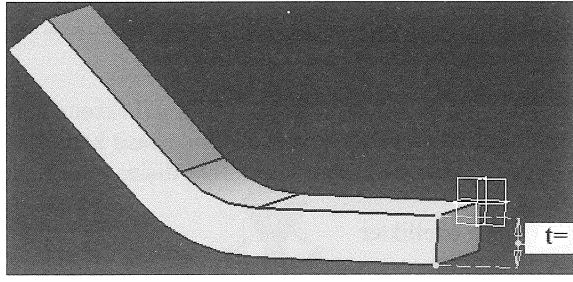
Parça Şekli  
 ...

Yüzey Kalitesi  
 0 µm

Maliyet Parça Şekli  
 ...

**SEÇİLEN PROSES**

**Kesit Kalınlığı**



t=  mm

**KAPAT**

(a) PROSEÇ başlangıç penceresi (b) Kesit kalınlığı değeri giriş penceresi

#### 4. UYGULAMA ÇALIŞMALARI

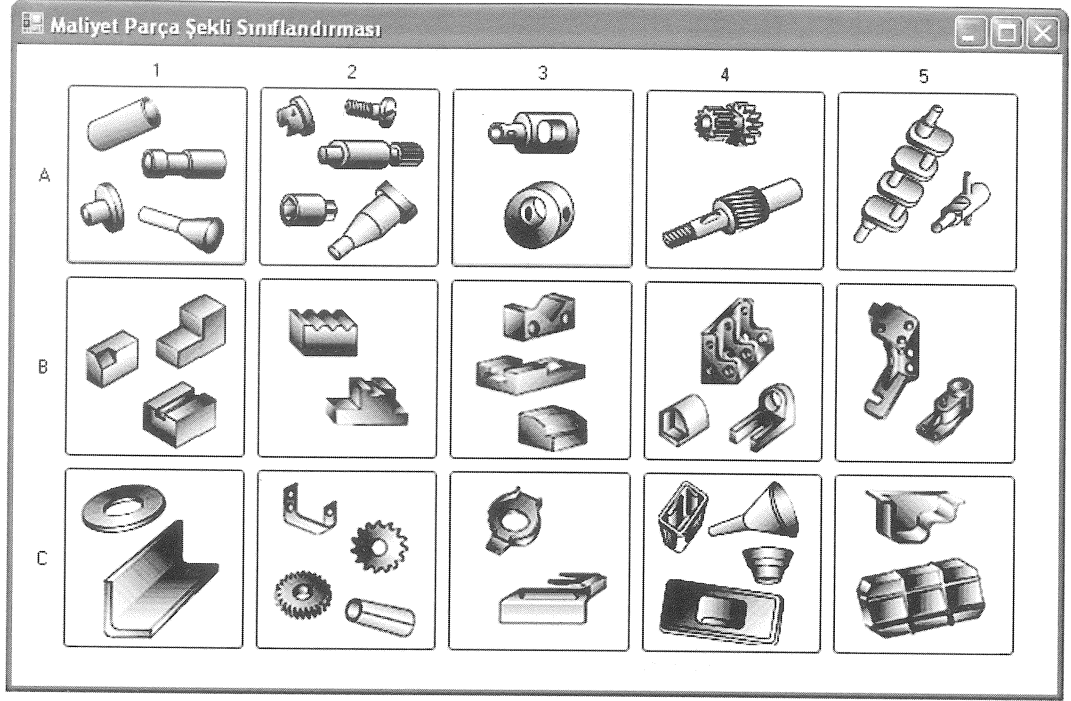
PROSEÇ in kullanımına ilk örnek uygulama sağlık sektöründe kalça kemiği protezinde kullanılan (Ek-1) pelvis protez parçası için gerçekleştirilmiştir. Ürün kalça kemiğinde kullanılacağından malzemesi paslanmaz çeliktir. Ürünün temel imalat proses seçimi için gerekli girdiler Çizelge 3'te verilmiştir. PROSEÇ programı bu uygulamada hassas döküm prosesini seçmiştir (Şekil 6).

Üretici firma bu ürünü PROSEÇ'in bulduğu gibi hassas döküm ile üretilmektedir. Kalça kemiği protezinde kullanılan bu ürünü üretmede malzeme, üretim miktarı ve parça ağırlığı sınırlamalarına uygun üç adet proses bulunmaktadır (Şekil 6). Bunlar

seramik kalıba döküm, kum kalıba döküm ve hassas dökümdür. PROSEÇ'in hassas dökümü seçmesinin nedeni yüzey kalitesi 0,4-3,2 aralığında en ekonomik üretimi yapan proses olmasıdır.

Çizelge 3. İlk örnek uygulama için girdiler

Malzeme	Paslanmaz Çelik
Üretim miktarı	350
Parça ağırlığı	0,6 kg
Kesit kalınlığı	25 mm
Parça şekli	T6
Yüzey kalitesi	1,6 µm
Maliyet parça şekli	A4



**Açıklama [15]:**

**A: Silindirik parçalar**

A1: Birincil eksene göre dönel özelliklere sahip parça şekli (birincil eksene göre simetrik dönel geometri)

A2: Birincil eksene göre dönel özelliklere sahip, ancak üzerinde basit konturlar bulunan parça şekli

A3: Birincil eksene paralel veya dik ikincil eksenlerdeki delikler, dişler ve diğer iç özelliklere sahip parça şekli

A4: İkincil eksen üzerinde karmaşık özellikler

A5: Düzensiz ve/veya karmaşık şekiller

**B: Prizmatik parçalar**

B1: Birincil eksen/düzlemde temel prizmatik şekilli parça şekli

B2: Birincil eksen/düzlemde ikincil özelliklere ( T kanal, dişli düzlem vb.) sahip temel prizmatik şekilli parça şekli

B3: Birden çok ekseninde açılı kanal / diş veya konturlu yüzeye sahip parça şekli

B4: Tek eksen/düzlemde basit eğrisel özelliklerde parça şekli

B5: Düzensiz ve/veya karmaşık konturlu şekiller (3 boyutlu konturlu yüzey/geometriler)

**C: Düz veya ince cidarlı bileşenlere sahip parçalar**

C1: Birincil ekseninde temel/basit şekilli parça

C2: Düzgün kesitli/cidarlı ikincil özelliğe sahip parça şekli

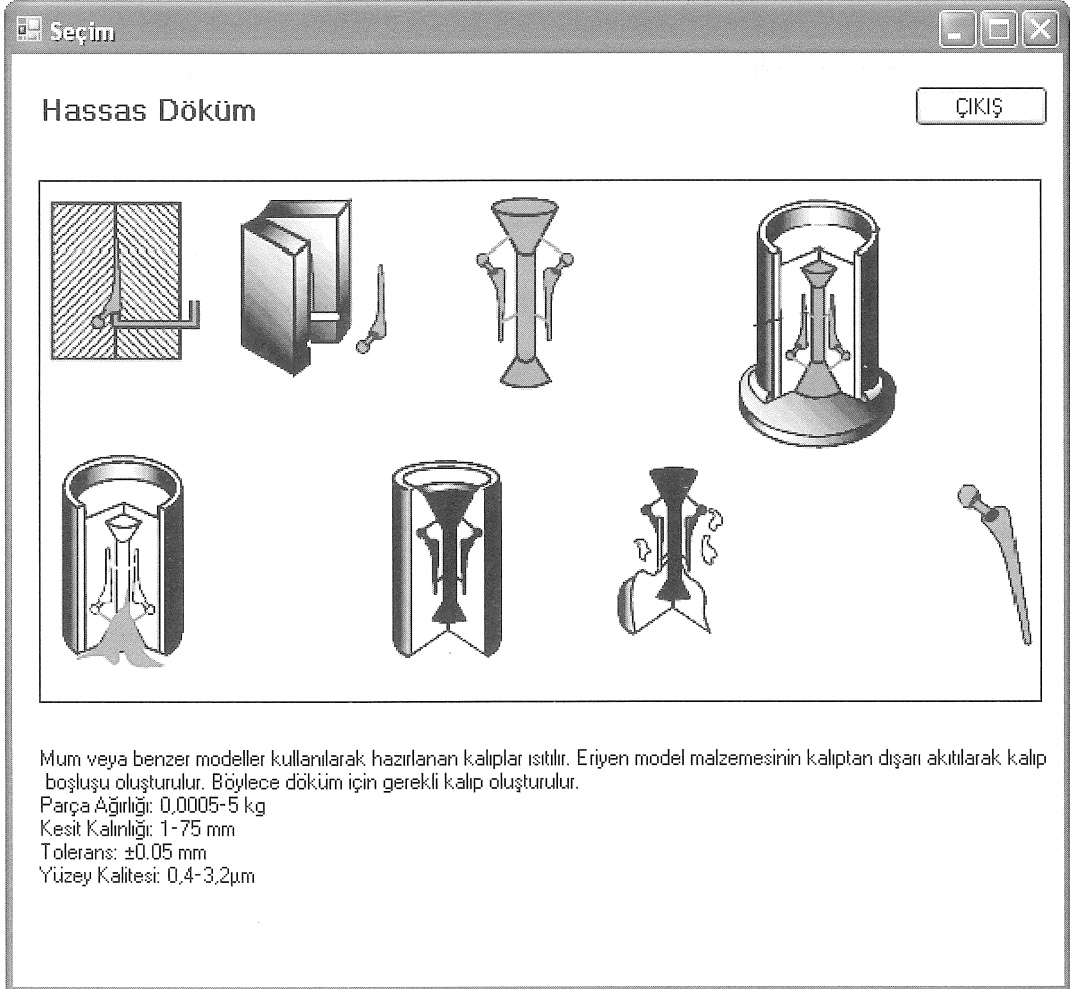
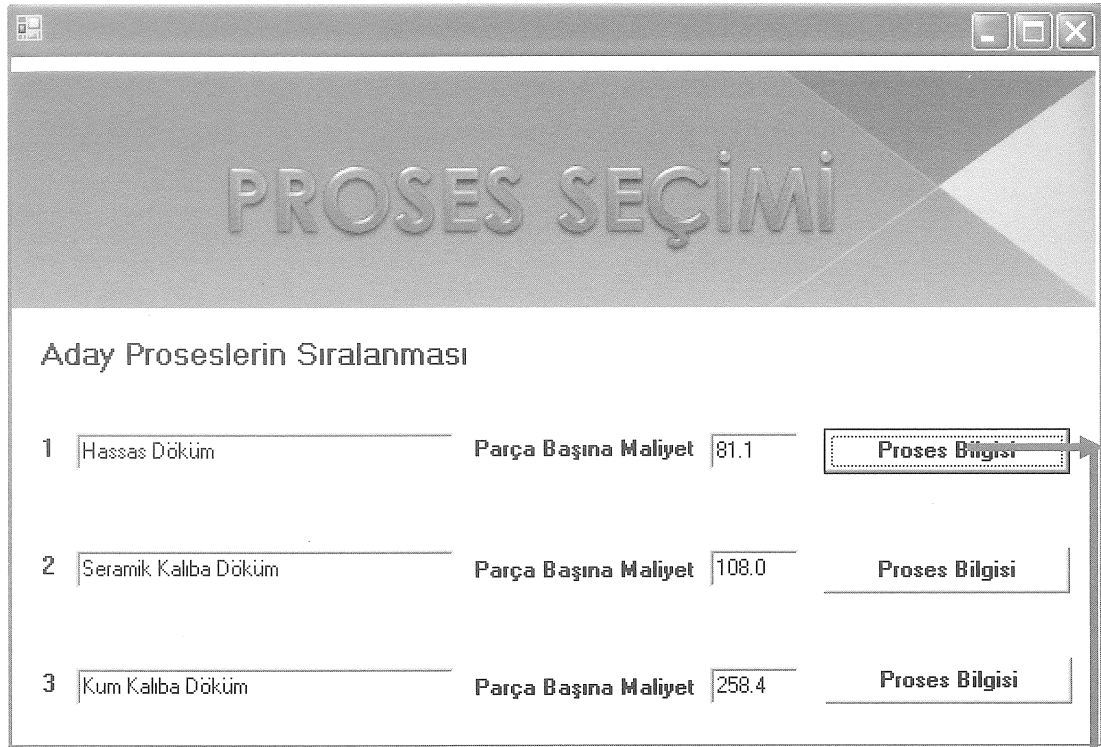
C3: Düzgün olmayan kesitli/cidarlı ikincil özelliğe sahip parça şekli

C4: Kesit kalınlığı değişen kutu tipi parça şekli

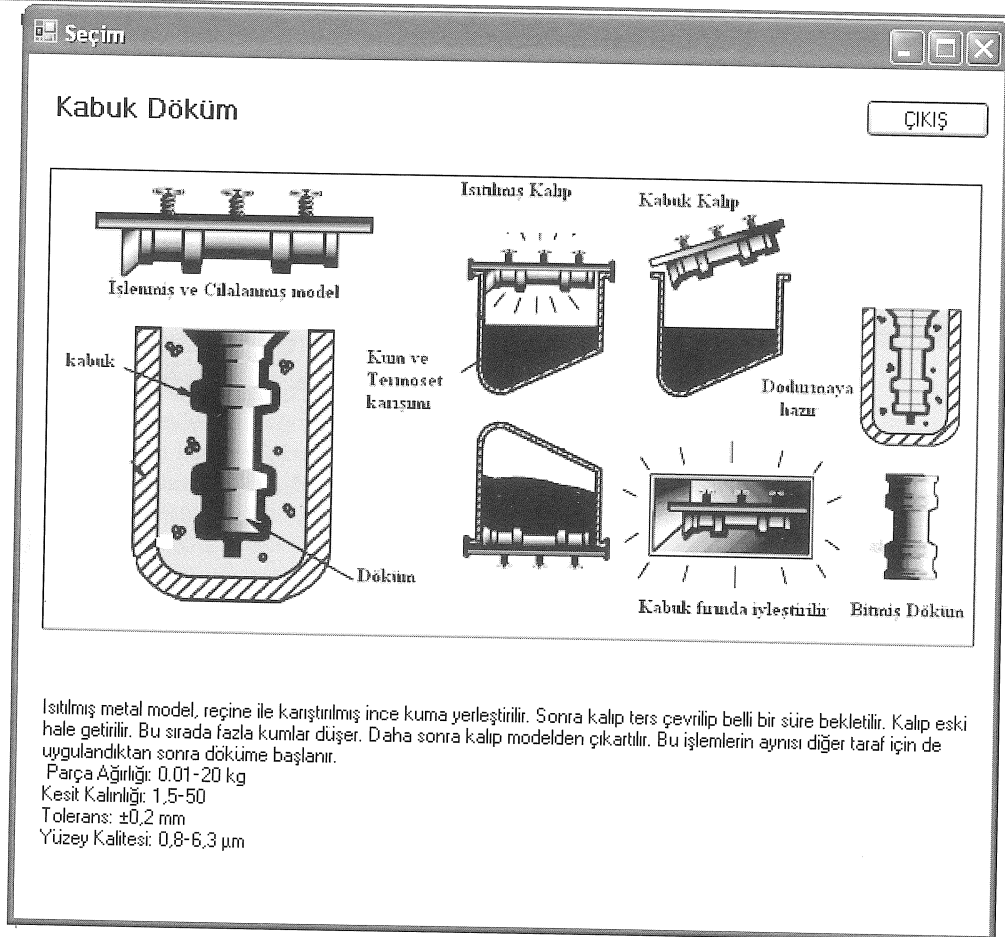
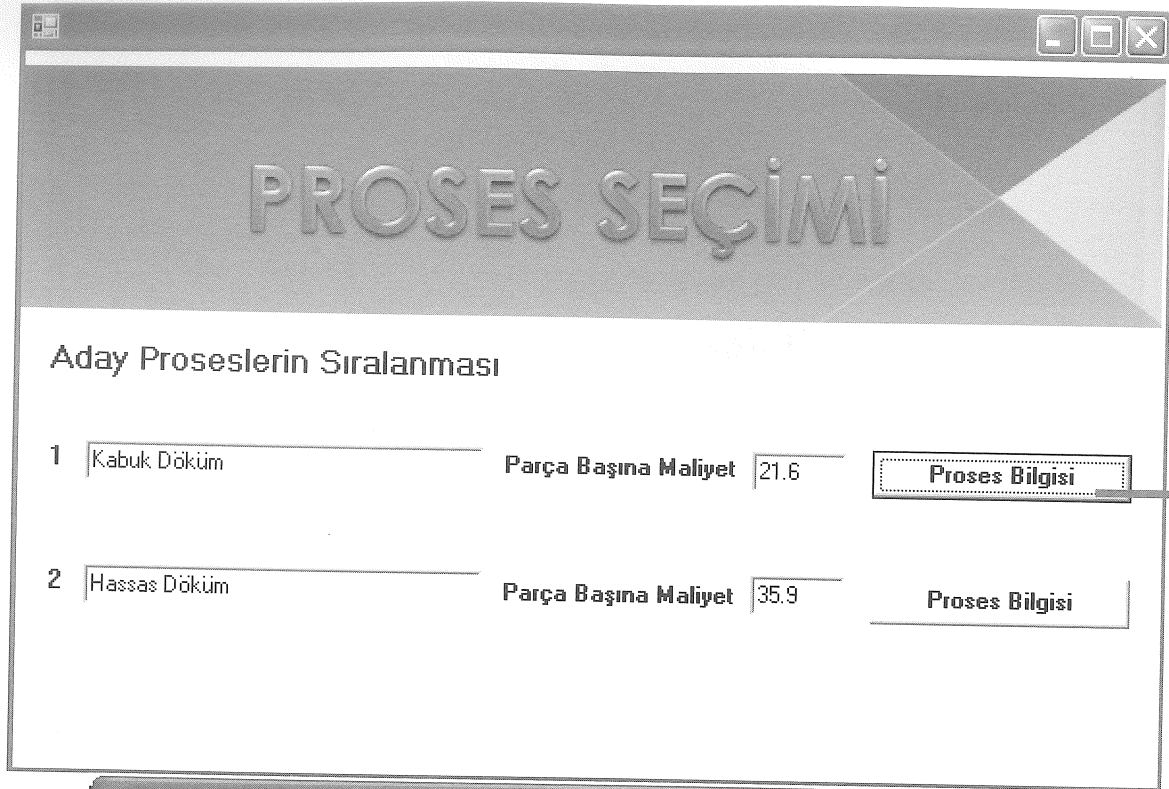
C5: Daha önceki kategorilerde yer almayan düzensiz konturlu karmaşık parça şekli

Şekil 5. Maliyet hesaplamaları için gerekli parça şekil karmaşıklığı penceresi





Şekil 6. İlk örnek uygulama için seçim penceresi



Şekil 7. İkinci örnek uygulama için seçim penceresi

Çizelge 5. İkinci uygulama için alternatiflerin maliyet karşılaştırması

Prosesler	$P_C$ (2000 Adet)	$C_{mp}$ (Demir)	$C_S$ (10 mm)	$C_f$ (1.6 $\mu m$ )	$C_C$ (B1)	Parça Başına Düşen Maliyet
KD	18	1,0	1,2	1	1	21,6
HD	25	1.0	1.25	1.0	1.15	35.9
KKD	16,8	1,0	1,2	1	1,1	22,2
Oİ	32,8	1,2	1	1	1	39,3
<b>KKD+Oİ</b>						<b>61,5</b>

HD: Hassas Döküm, KKD:Kum Kalıba Döküm, Oİ: Otomatik İşleme, KD: Kabuk Döküm

İkinci uygulama örneğinde demirden üretilen CNC abkant pres parçasının (Ek-2) yıllık üretim miktarı, ağırlığı, kesit kalınlığı ve yüzey kalitesi değerleri Çizelge 4'te verilmektedir. Parça şekli olarak P1, maliyet parça şekli olarak ise B1 seçilmiştir. Parça şekli için prizmatik ve karmaşıklık seviyesi ise 1. seviye seçilmiştir. Maliyet parça şeklinde ise parça yine prizmatik ve imalat sadece tek bir birincil eksenle gerçekleştirildiği için basit unsurlu 1. seviye seçilmiştir.

Çizelge 4. İkinci örnek uygulama için girdiler

Malzeme	Demir
Yıllık Üretim miktarı	2000
Parça ağırlığı	0,266 kg
Kesit kalınlığı	10 mm
Parça şekli	P1
Yüzey kalitesi	1,6 $\mu m$
Maliyet parça şekli	B1

Programa ürünle ilgili verilerin girilmesinin ardından PROSEÇ en uygun proses olarak Şekil 7'de görüldüğü gibi ilk sırada kabuk dökümü ve ardından hassas dökümü vermektedir. Pratikte ise ürün kum kalıba dökülmüş halde üretilip ardından gereken yüzey kalitesini sağlamak için CNC tezgahlarda otomatik işleme ile son halini almaktadır. Çizelge 5'te PROSEÇ'in çıktıları olan Hassas Döküm (HD), Kabuk Döküm (KD) ile pratikte kullanılan Kum Kalıba Döküm (KKD) ve ardından Otomatik İşleme (Oİ) nin karşılaştırılmasında görüldüğü gibi PROSEÇ'in kabuk dökümü seçmesinde maliyet analizi etkili olmuştur. PROSEÇ abkant presi parçası gibi basit şekilli ürünlerde ( $C_C$  (B1)) ve düşük üretim miktarlarında ( $P_C$  (2000 Adet)) ikinci en iyi seçim olan hassas döküm yerine kabuk dökümü tercih etmiştir. Hassas döküm karmaşıklık seviyesi yüksek olan parçaların üretiminde daha avantajlı olması beklenmelidir.

Makalede verilen ve yazarlarca gerçekleştirilen diğer tüm uygulamalarda PROSEÇ'in oldukça başarılı olduğu, pratikte ürünün imalatında başarıyla uygulanan ve daha ucuz üretim

yapacak prosesleri önerdiği görülmüştür. PROSEÇ prosesleri sadece yapabilirlik olarak incelememekte, detaylı bir ekonomik analiz sayesinde ürünü üretmede en uygun prosesi sunmaktadır.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada birincil proses seçimi için bir karar destek sistemi (PROSEÇ) geliştirilmiştir. Oluşturulan PROSEÇ gerçek hayattan uygulamalarla test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde PROSEÇ'in pratikte kullanılan prosesleri veya daha ekonomik üretim yapacak prosesleri önerdiği görülmüştür. PROSEÇ'in özellikle teknik bilgi birikimi sınırlı olan küçük ve orta büyüklükteki imalat firmalarına daha fazla faydalı olabileceği, bu türdeki firmaların birincil proses seçimi konusunda doğru kararlar almalarına ve üretim maliyetlerini düşürerek karlılıklarını artırma konusunda katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

PROSEÇ kolaylıkla ekleme yapılabilecek tarzda tasarlanmıştır. Örneğin, bu çalışmada düşünülmeden alüminyum, bakır gibi sanayide yoğun olarak kullanılan malzemelerle ürünlerin üretilmesi için proses seçim akış şemaları da geliştirilip karar destek sistemine eklenebilir. Ayrıca yine sanayide yoğun olarak kullanılan alüminyum veya çelik malzemeli saç metallere üzerine yapılan saç metal prosesleri (derin çekme, kesme, vb.) farklı bir modül olarak geliştirilip PROSEÇ'in başlangıç penceresinde seçilebilir.

PROSEÇ'in kullanılmasına yönelik bir son not olarak, son derece hassas toleranslarda üretilecek parçalar için seçim işleminde son derece dikkatli olunması gerekmektedir. PROSEÇ bu tür durumlarda iyi bir çözüm öneremeyebilir. Son derece dar toleranslarda üretilecek parçalar için pratikte birincil proseslerin ardından ikincil tamamlayıcı prosesler kullanılmaktadır. Bu tür durumlarda PROSEÇ dar toleransları sağlayamayacağı gerekçesiyle ikincil proseslerle beraber kullanılan kum kalıba döküm gibi bazı birincil prosesleri eleyebilir. Fakat elenen bu prosesler otomatik işleme gibi ikincil proses adımları ile daha ekonomik çözümler sunabilir. Benzer sonuçlar parçada birbirinden farklı toleranslar

bulunduğunda da söz konusu olabilir. İleride yapılacak çalışmalarda birleşik (birincil proses+ikincil proses) prosesler oluşturularak birincil proseslerle beraber PROSEÇ içerisinde yer alabilir.

#### DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM TO USE IN SELECTION OF PRIMARY MANUFACTURING PROCESSES

Developments in the capabilities of the manufacturing processes increased the number of processes that can produce a part within the requirements determined by its design and market research. The increased number of processes and unfamiliarity of manufacturing engineers to many new manufacturing processes force the researchers to develop systematic process selection tools instead of depending on the accumulated human expertise only.

In this paper, a primary manufacturing process selection decision support system, which is named PROSEÇ, is developed.

The developed selection program eliminates the unsuitable processes step by step by checking a part's material, annual production quantity, specified shape, thickness, etc. and presents the most economical process as the most appropriate primary process after a final cost analysis. The developed decision support system is written in Visual Studios 2008 and tested with a great deal of real life examples. It can be concluded from the tests that the program provides the same or better primary manufacturing process selection decisions than the expert selections, and it is a very useful support tool for primary process selections.

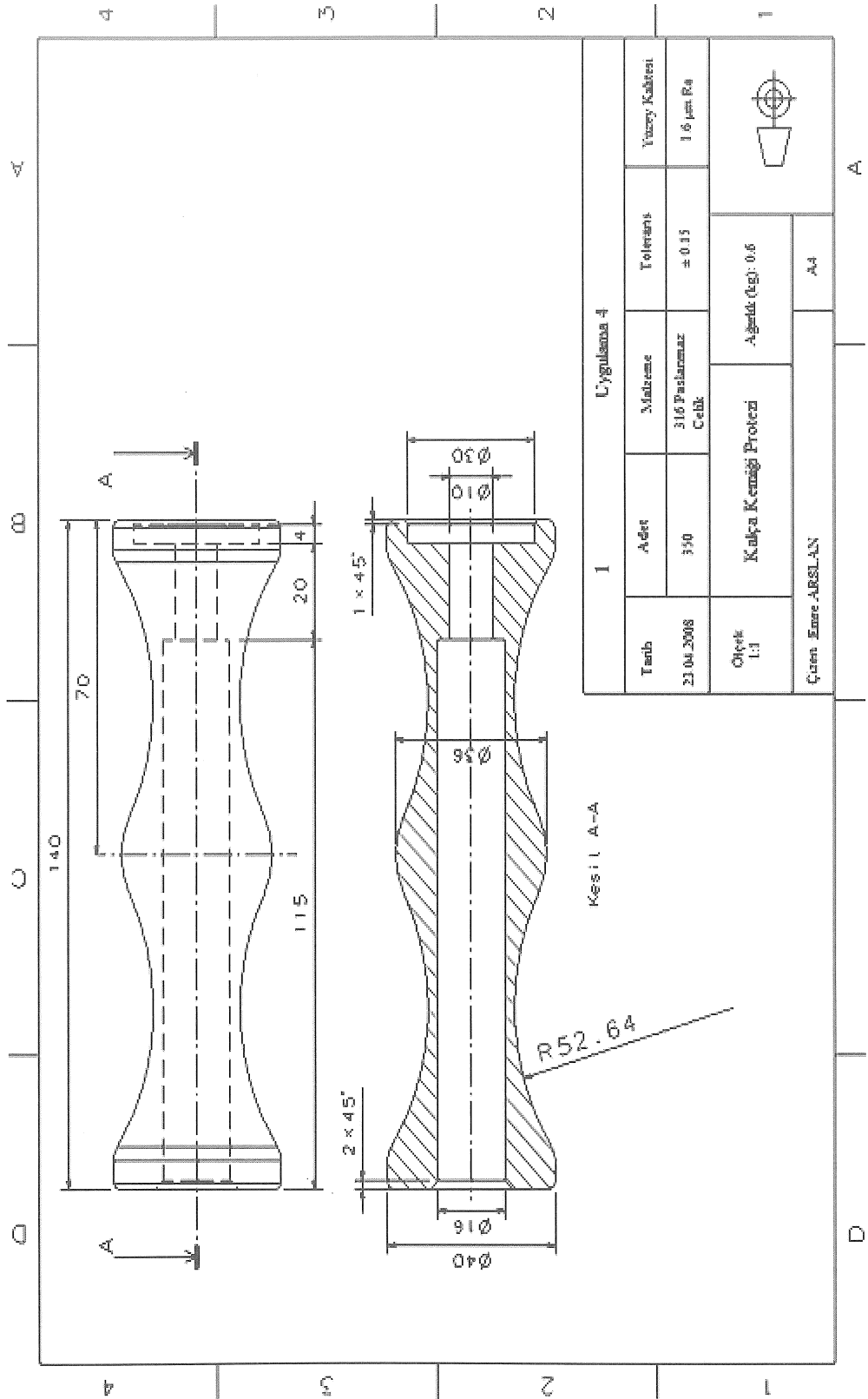
**Keywords:** Manufacturing processes, Decision support system, Primary manufacturing process selection.

#### KAYNAKÇA

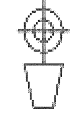
1. Smith, C.S., *The Manufacturing Advisory Service: Web Based Process And Material Selection*, Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, USA, 1999.
2. Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, And Systems*, John-Wiley& Sons, Third Edition, New York, N.Y., 2007.
3. Esawi, A.M., Ashby, M.F., *The Development and use the Early Stages of Design*, Proceedings of 3rd. Biennial World Conference on Integrated Design and Process Technology, Berlin, Germany, Vol:3, 210-217, 1998.
4. Zha, X., Du, H., Manufacturing Process and Material Selection in Concurrent Collaborative

- Design of MEMS Devices, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13 (2003), 509-522.
5. DeGarmo, E.P., Black, J.T., and Ronald, A.K., *DeGarmo's Materials and Process in Manufacturing*, John Wiley & Sons, Tenth Edition, New-York, NY, 2007.
6. Djassemi, M., *A Computer-Based Economic Analysis for Manufacturing Process Selection*, 2008 IAJC-IJME International Conference on Engineering & Technology: Globalization of Technology-Imagine the Possibilities, Nashville, TN, USA, November, 17-19, 2008.
7. Bock, L., Material Process Selection Methodology: Design for Manufacturing and Cost Using Logic Programming", *Cost Eng.*, 33(1991), 9-14.
8. Kunchithapatham, A., *A Manufacturing Process and Materials Design Advisor*, Master of Science Thesis, University of California, Berkeley, USA, 1996.
9. Giachetti, R.E., Jurrens, K.K., *Manufacturing Evaluation of Designs: A Knowledge-Based Approach*, Proceedings 3rd Joint Conference on Information Sciences (JCIS) (Research Triangle Park, NC, 1-5 March), Vol:1, 194-197, 1997.
10. Giachetti, R.E., A Decision Support System for Material and Manufacturing Process Selection, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9 (1998), 265-276.
11. Esawi, A.M., Ashby, M.F., Cost Estimates to Guide Pre-Selection of Processes", *Materials and Design*, 24 (2003), 605-616.
12. Ashby, M.F., *Material Selection in Mechanical Design*, 2<sup>nd</sup> ed., Oxford, Butterworth Heinemann, UK (1999).
13. Brown, S.M., Wright, P.K., A Progress Report on the Manufacturing Analysis Service, an Internet-Based Reference Tool" *Journal of Manufacturing Systems*. 17 (5) (1998), 389-398.
14. Zha, X., A Web-Based Advisory System for Process and Material Selection in Concurrent Product Design for A Manufacturing Environment, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25 (2005), 233-243.
15. Swift K.G., Booker, J.D., *Process Selection-From Design to Manufacture*, Butterworth-Heinemann, 2<sup>nd</sup> ed., Burlington, 2003.
16. Scallon, P., *Process Planning - The Design/Manufacture Interface*, Butterworth-Heinemann, Burlington, 2003.
17. Arslan, E., *İmalat Prosesi Seçiminde Kullanılacak Bir Karar Destek Sisteminin Geliştirilmesi* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.

Ek-1. Pevis protez parçasının teknik resmi



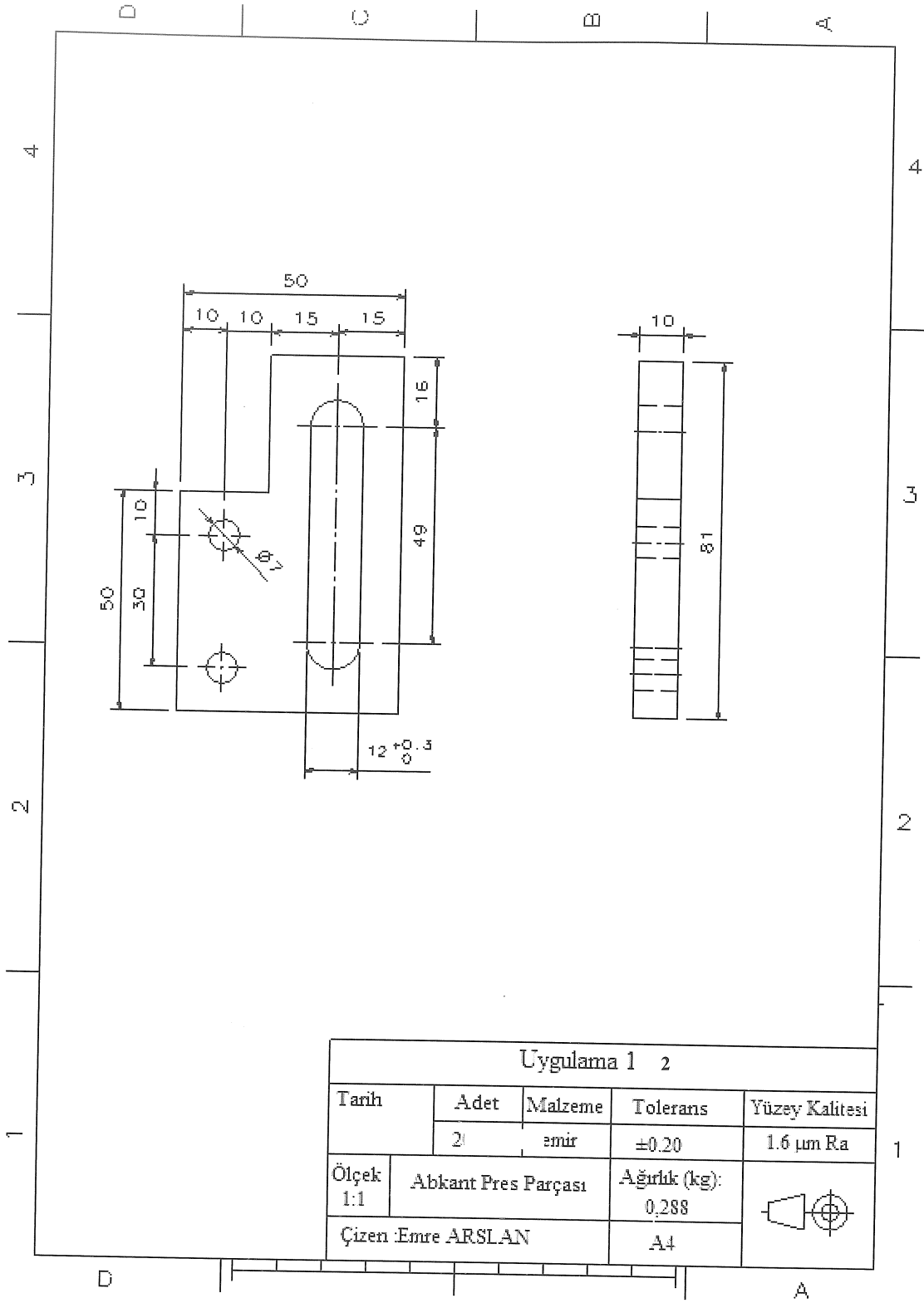
Uygulama 4			
Tarih	Adet	Malzeme	Tolerans
23.04.2008	350	316 Paslanmaz Çelik	$\pm 0.15$
Ölçek	Kalça Kemikçi Protezi	Ağırlık (kg): 0.6	
1:1		A4	
Çizen Emre ARSLAN			



of  
13  
ald,  
in  
nth  
nic  
on,  
on  
of  
lle,  
ion  
nd  
ig.,  
ess  
of  
ria,  
ing  
sed  
on  
gle  
for  
on,  
(8),  
to  
als  
cal  
nn,  
ort  
an  
of  
8.  
for  
ent  
ing  
ced  
13.  
on-  
th-  
gn/  
th-  
ide  
nin  
azi  
ira,



Ek-2. CNC Abkant pres parçasının teknik resmi



H. Cesur  
Mak. Yük. Müh.

B. Kaftanoğlu  
Prof.Dr.

Üretim Mühendisliği Bölümü,  
Atılım Üniversitesi, Ankara

A. Kalkanlı  
Prof.Dr.

Malzeme ve Metalürji Mühendisliği  
Bölümü, Orta Doğu Teknik  
Üniversitesi, Ankara

B. Oral  
Doç.Dr.

Vaksis Ar-ge ve Danışmanlık  
Şirketi, Ankara

# Bor Nitrür Kaplamaların Çelik Alt Malzemeler Üzerinde RF Magnetron Saçtırma Yöntemiyle Büyütülmesi

*Bor nitrür kaplamalar Silikon ve çelik alt malzemeler üzerinde radyo frekanslı (rf) magnetron saçtırma yöntemiyle hegzagonal bor nitrür hedef plaka kullanılarak büyütülmüştür. Büyütme işlemi gaz oranı 5 e 1 olacak şekilde Argon ve Azot gaz karışımında ve  $3 \times 10^{-3}$  Torr basınç altında gerçekleştirilmiştir. Büyütme işleminde ana parametreler olan alt malzeme (bias) voltajı ve ortam sıcaklığının etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın amacı bor nitrür kaplamaların alt malzeme yüzeylerinde oluşturularak metal kesme işleminde kullanılabilmesi için gerekli sertlik ve yapışkanlığı elde etmektir. Deneyler sonucu elde edilen kaplamaların nitelendirilmesi için Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-Ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) teknikleri kullanılmıştır. Çelik örnekler üzerindeki kaplamaların mekanik özellikleri ise kalınlık, sürtünme katsayısı, aşınma ve yapışkanlık ölçümleriyle belirlenmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Bor Nitrür, Magnetron Saçtırma, Yüksek Hız Çeliği*

## 1. GİRİŞ

Kübik bor nitrür (c-BN) sahip olduğu üstün mekanik ve kimyasal özelliklerinden dolayı önemli bir kaplama malzemesi olarak kesici uç uygulamalarında son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, iyi ısı iletkenlik, yüksek elektrik dirençliliği, iyi aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılığı göze çarpan özellikleri olarak sayılabilir. [1-3] Kübik bor nitrür elmaştan sonra bilinen en sert malzemedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda oksijen ve demirli malzemelere karşı gösterdiği kimyasal kararlılığı elmasa göre daha üstün bir özelliktir. Bor nitrür, kaplamalarda genellikle iki farklı fazda oluşur. Bunlar hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve kübik bor nitrürdür (c-BN). Hegzagonal bor nitrür yumuşak, düşük sürtünme katsayısına sahip, düşük ve yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı özelliğe sahip, yalıtkan ve ısı iletkenliğe sahip bir malzeme olarak bilinir. Katı yağlayıcı olarak metal şekillendirme kalıplarında ve metal şekillendirme işlemlerinde yüksek sıcaklık ortamında yaygın olarak kullanılmaktadır. [4] Hegzagonal fazın aksine, kübik bor nitrür gösterdiği yüksek sertlik ve yukarıda belirtilen üstün özellikleri sayesinde kesici takımlar için kaplama malzemesi olarak ön plana çıkmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı kübik bor nitrürün kuru kesme, yüksek hızda kesme ve sert malzemelerin işlenmesi gibi kesici takım

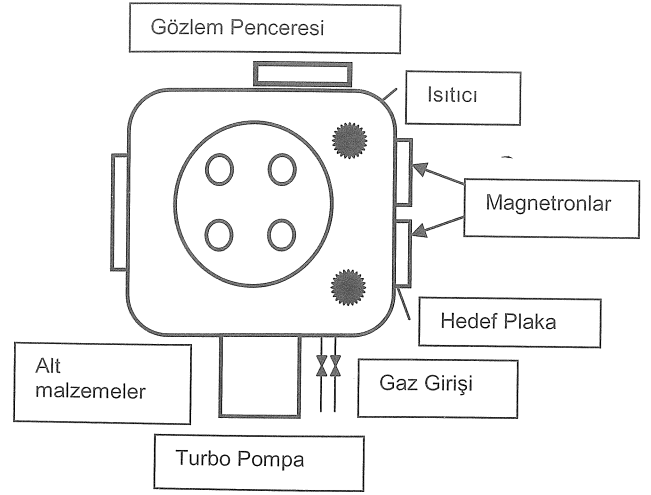
uygulamalarında kullanımı son yıllarda artış göstermiştir. [5-6] Bugün piyasada sinterlenmiş kübik bor nitrür kesici takımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak sinterlenmiş c-BN uçların en büyük olumsuzluğu yüksek maliyetleri, düşük süneklik özelliği ve farklı kesici uç geometrilerinde üretim zorluluğudur. [7] Bu yüzden, bor nitrürün ince ve kalın filmler halinde büyütülmesi ihtiyacı sadece metal kesme için değil aynı zamanda koruyucu kaplama, optik kaplama ve elektriksel iletken katmanlar için ortaya çıkmıştır. Bunun sonucunda da, son yıllarda birçok araştırmacı kübik fazda bor nitrür sentezleyebilmek için çalışmalar yapmışlardır. Kaplama yöntemleri arasında, saçtırma tekniği – bir Fiziksel Buharlaştırma Yöntemiyle Büyütme (FBYB) işlemi – düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi, çok ince kaplamalar elde edebilme imkânı ve keskin köşelerde ve karmaşık geometriler üzerinde büyütülme yapılabildiği için daha çok tercih edilmektedir. FBYB magnetron saçtırma tekniği ile büyütülen kübik bor nitrür kaplamalarla ilgili birçok çalışmayı literatürde bulmak mümkündür. [8-16] FBYB saçtırma tekniği kullanılarak büyütülen c-BN filmlerdeki ana problemler film ve alt malzeme arasında düşük yapışkanlık ve filmin içinde oluşan yüksek basma gerilimlerdir ve bu problemler c-BN kaplama kalınlığını en çok 1 µm ile sınırlandırmaktadır. Ancak birçok araştırmacı da iyi yapışkanlık gösteren ve çok tabakalı kalın filmleri büyütebildiklerini bildirmişlerdir. [17-20]

Bu çalışmada, bor nitrür filmler Silikon ve yüksek hız çeliği üzerinde radyo frekanslı magnetron saçırma tekniği ile büyütülmüştür. Özellikle c-BN filmlerin çelik üzerinde oluşturularak kesici takım uygulamalarında kullanılması ve yüksek sertlik için en yüksek kübik orana sahip bor nitrür kaplamanın elde edilmesi amaçlanmıştır. Büyütme sürecine etki eden iki ana parametrenin, sıcaklık ve alt malzeme voltajı, etkisi sabit gaz oranında araştırılmıştır. Elde edilen filmlerin nitelendirilmesi için Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-Ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve Taramalı elektron spektroskopisi (SEM) teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca, kalınlık, sürtünme katsayısı, aşınma ve yapışkanlık gibi mekanik özelliklerinin ölçümleri de kalotest, tribometre, profilmetre ve çizik (scratch) test cihazları kullanılarak yapılmıştır.

## 2. DENEYSEL

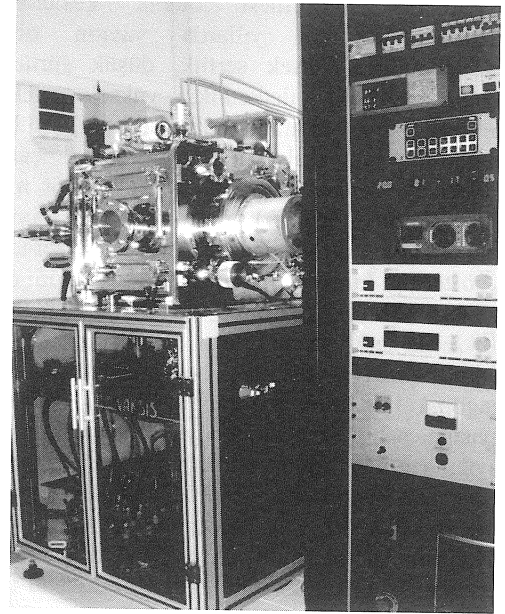
Bor nitrür filmler Si (100) yonga plakalar ve çelik alt malzemeler üzerinde 13.56 Mhz frekans altında magnetron saçırma tekniğiyle büyütülmüştür. Büyütme sistemine ait şematik diyagram ve fotoğraf Şekil 1. ve Şekil 2. de görülebilir. Katot olarak dikdörtgen şekilde 100x250 mm boyutlarında sinterlenmiş hegzagonal bor nitrür (h-BN) plaka kullanılmıştır. Alt malzeme olarak da 20x20 mm boyutlarında kare Si yonga plaka ve 30 mm çapında çelik diskler kullanılmıştır. Alt malzemeler bir tutucu yardımıyla dönen bir mil mekanizmasına bağlanarak döndürülürken, aynı zamanda ikinci bir rf kaynağıyla alt malzemelere güç uygulanmıştır. Dönen mil bağı alt malzemelere hem ekstenel hem de gezegen hareketi yapabilmekte olup, dönme hızı ve dönme yönü bilgisayar tarafından kontrol edilebilmektedir. Alt malzemeler ile h-BN hedef plaka arasındaki mesafe ise bütün deneylerde 50 mm olarak sabit tutulmuştur.

Büyütme işlemine başlamadan önce vakum haznesi basıncı  $5 \times 10^{-6}$  Torr a kadar turbo pompa vasıtasıyla düşürülmüştür. Daha sonra vakum haznesi Argon ve Azot gazlarıyla (Ar/N<sub>2</sub> oranı 5/1 olacak şekilde) doldurularak sistem basıncı  $3 \times 10^{-3}$  Torr a getirilmiştir. Gaz akış miktarları sistem kontrol panelinde yer alan kontrolcüler üzerinden değiştirilebilmektedir. Vakum haznesinin içinde yer alan iki adet lamba ısıtıcı sayesinde sıcaklık 400°C ye kadar çıkartılabilmektedir. Sıcaklık ısıtıcıların çıkışına yerleştirilen ısılıcift ile ölçülüp PID kontrolcüsüyle de istenen sıcaklığa ayarlanabilir. Silikon yonga plakası ve parlatılmış çelik örnekler sırasıyla aseton, etil alkol ve saf suda ultrasonik olarak 20 dk boyunca yıkanmıştır.



Şekil 1. RF magnetron saçırma sisteminin şematik görünümü

Büyütme işlemine başlanmadan önce, Argon ortamında -400 V rf güç verilerek plazma temizliği yapılmıştır. Bu işlem kaplama kalitesi, yapışkanlığı ve yüzey temizliği için zorunludur. Plazma temizliğinden sonra ise hedef plakaya rf gücü uygulanmıştır ve bu güç 900 W a kadar düzenli olarak artırılmış ve deney sonuna kadar 900 W da sabit tutulmuştur. Deneylerde sıcaklık 200-250 °C arasında tutulurken, alltaşa uygulanan gerilim ise 100 ile 200 V arasında değiştirilmiştir. Büyütme işlemi 2 saat boyunca devam ettirilmiştir. Deney değişkenleri Tablo 1. de sıralanmıştır.



Şekil 2. Magnetron saçırma düzeneğinin fotoğrafı

Tablo 1. c-BN büyütme işleminde kullanılan deney değişkenleri

Hedef plaka	h-BN plaka
Alt malzemeler	Si yonga plakası ve çelik diskler
Taban basınç	5x10 <sup>-6</sup> Torr
Büyütme basıncı	3x10 <sup>-3</sup> Torr
Ar/N <sub>2</sub> akış oranı	5/1
Magnetron gücü	900 W
Alt malzeme voltajı	100-200 V
Isıtıcı Sıcaklığı	200-250 °C
Büyütme Mesafesi	50 mm
Büyütme Süresi	2 saat

BN filmlerin kalınlıklarını ölçmek için öncelikle kalotest cihazıyla çelik örnekler üzerine oyuklar açılmıştır ve bu oyuklara optik mikroskop altında bakılarak kaplama kalınlığı hesaplanmıştır. 2 saatlik büyütme sonucunda yaklaşık olarak 0.5 µm kalınlık elde edilmiştir. Buna ilaveten, kaplamanın fazını anlamak için ise Fourier Transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR) metodu kullanılmıştır. Yüze morfolojisinin tespiti Taramalı Elektron Mikroskopuyla (SEM) yapılırken, film bileşiminin anlaşılması ve bağ enerjilerinin ölçülebilmesi için X-Ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) tekniği kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı, aşınma ve yapışkanlık gibi mekanik özellikler ise tribometre, profilmetre ve çizik test cihazlarıyla tespit edilmiştir

### 3. ANALİZ VE DEĞERLENDİRMELER

#### 3.1. BN filmlerin yapısal karakterizasyonu

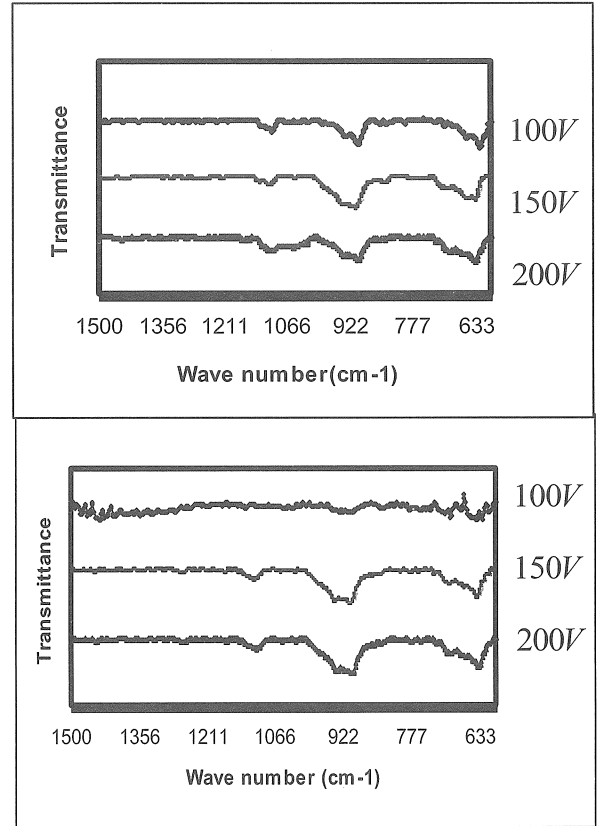
##### 3.1.1. FTIR Ölçümleri

Kaplama fazının kübik mi yoksa hekzagonal mı olduğunu anlamak için Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR) denilen teknik kullanılmıştır. Şekil 3. de Silikon yonga plakalar üzerinde değişik sıcaklık ve değişik alt malzeme voltajları altında büyütülen bor nitrür filmlere ait FTIR spektrumu görülmektedir. Bor nitrür kaplamalarda kübik faz için soğurma tepe noktası yaklaşık 1060 cm<sup>-1</sup> dalga sayısında görülürken, hekzagonal faz için bu değerler yaklaşık 780 ve 1380 cm<sup>-1</sup> dalga boylarında görülmektedir [11-16]. Kübik faz oranı ise FTIR grafiklerindeki tepe yüksekliklerinin aşağıdaki formül kullanılarak birbirlerine oranlanmasıyla bulunmaktadır.

$$cBN\% = \frac{I_{cBN}}{I_{cBN} + I_{hBN}} \times 100\% \quad (1)$$

Şekil 3. de görüldüğü gibi kübik bor nitrür oranı sıcaklık ve uygulanan alt malzeme voltajına göre değişiklik göstermektedir. İlk deney setinde,

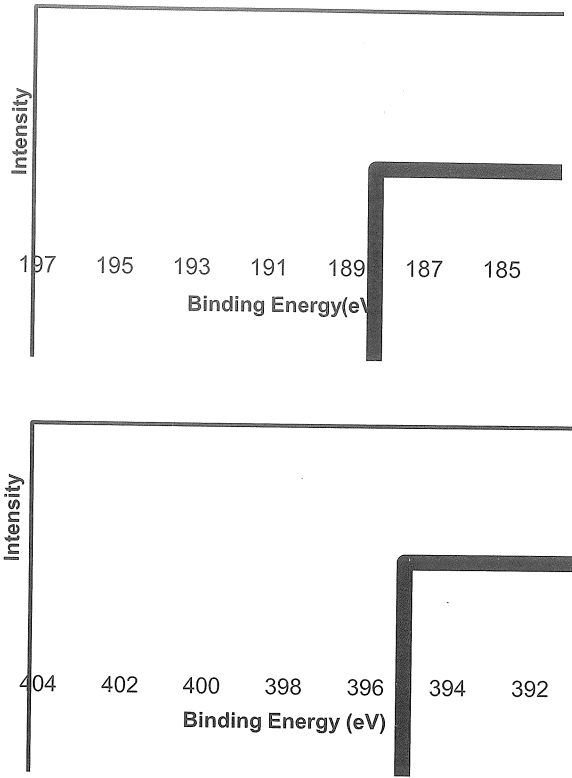
sıcaklık 200 °C de sabit tutulup alt malzeme voltajı 100V ile 200V arasında değiştirilmiştir. İkinci deney setinde ise, sıcaklık bu kez 250 °C de sabit tutulmuş ve voltaj değerleri değiştirilmiştir. FTIR sonuçları kıyaslandığında %75 ile en yüksek kübik faz oranı 200 °C sıcaklık ve 200 V alt malzeme voltajı altında büyütülen bor nitrür kaplamada gözlemlenmiştir.



Şekil 3. (a) 200 °C de büyütülen BN filmlerinin FTIR spektrumu, (b) 250 °C de büyütülen BN filmlerinin FTIR spektrumu

##### 3.1.1. XPS Ölçümleri

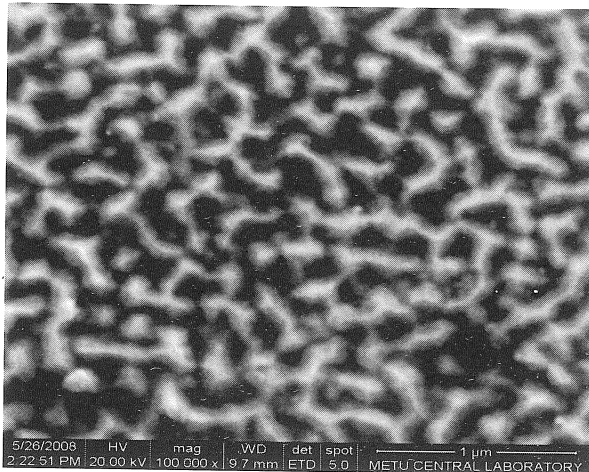
X-Ray fotoelektron spektroskopisi(XPS) büyütülen filmlerin bileşimsel analizinin yapılmasında kullanılmıştır. Şekil 4. de 200 °C de ve 200 V alt malzeme voltajı altında çelik örnek üzerinde büyütülen XPS spektrumuna ait grafik görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, bor ve azota (B<sub>1s</sub> ve N<sub>1s</sub>) ait tekli kimyasal durumlara ait tepe noktaları 190,3 ve 397,5 eV bağ enerjilerinde görülmüştür. [8] Ayrıca, XPS analizinden elde edilen bileşimsel oranda B/N= 1,1 olarak bulunmuştur ki bu da filmlerin stokiometrik olarak başarılı bir biçimde büyütüldüğünü göstermektedir.



Şekil 4. Bor ve Azot atomlarının 1s bağ enerjilerine ait XPS spektrumu

### 3.1.1. Elektron Mikroskopu Ölçümü

Filmlerin yüzey morfolojilerinin anlaşılması için Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) bakılmıştır. Şekil 5.de Silikon yonga plakası üzerindeki filme ait 100 000 kere büyütülmüş fotoğraf görülmektedir.



Şekil 5. Silikon yonga plakası üzerinde büyütülmüş BN filme ait SEM fotoğrafı

## 3.2. BN filmlerin mekanik karakterizasyonu

### 3.2.1. Kalınlık Ölçümü

Bor nitrid filmlerin kalınlığı kalotest cihazıyla tahrip edici biçimde ölçülmüştür. Çelik örnekler kalotest cihazındaki mengeneler arasına sıkıştırıldıktan sonra kaplanmış yüzey dönen bir mile bağlı çelik bir küre ile temas ettirilmiştir. Aşındırıcı sıvının ilave edilmesiyle, mil belirli bir hızda döndürülmeye başlanmıştır. Mile bağlı çelik kürenin dönmesiyle de kaplama yüzeyinde krater oluşmaya başlamıştır. Bu işleme krater yeterli boyuta ulaşmaya kadar devam edilmiştir. Daha sonra optik mikroskop altında kaplama ve alt malzeme yüzeyinde oluşan kraterin çapları ölçülmüş ve basit bir formül yardımıyla kaplama kalınlığı yaklaşık olarak hesaplanmıştır. İki saat süren deney sonucu yaklaşık kalınlık 0.5 µm olarak hesaplanmıştır. Farklı deney süreleri için kaplama değerleri Tablo 2. de verilmiştir.

Tablo 2: Farklı büyütme sürelerine göre ölçülen kaplama kalınlıkları

Süre	1 hr	2 hr	3hr
Kalınlık	0.2 µm	0.5 µm	0.8 µm

### 3.2.2. Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Ölçümleri

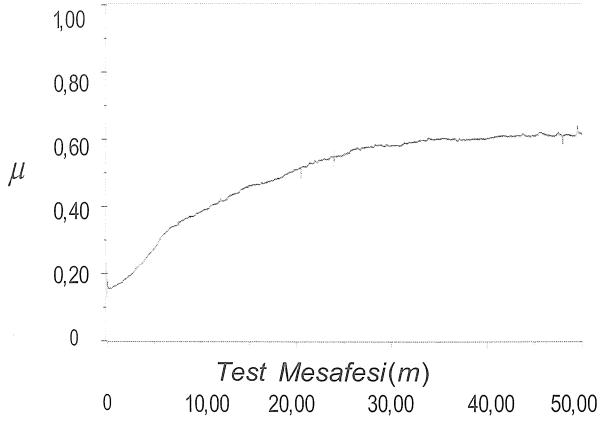
Sürtünme katsayısına ait bilgiye ulaşmak için tribometre denilen cihaz kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı ölçümleri hava ortamında oda sıcaklığında ve yağlayıcı kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Karşı malzeme olarak 6 mm çapında alümina top kullanılmıştır. Testler 1 N normal yük altında, 50 mm/s lineer hızda, dönüş çapı 5 mm olacak şekilde 50 m boyunca yapılmıştır. Şekil 6. daki grafikte de görüleceği gibi bu test koşullarında alüminaya karşı ortalama sürtünme katsayısı 0,5 olarak ölçülmüştür. Kübik bor nitridin çeliğe karşı sürtünme katsayısı daha önce yapılan çalışmalarda 0,4 olarak belirtilmiştir ki, bu da elde edilen sonuçları anlamlı kılmaktadır. [21] Aşınma ölçümleri için tribometre testi sonucu oluşan izlere profilemetre denilen cihaz altında bakılmıştır. Ancak, aşınma izlerini yüzey pürüzlülüğünden ayırt etmek mümkün olmamıştır. Buradan yola çıkarak bor nitrid kaplamaların oldukça iyi aşınma direncine sahip olduğu söylenebilir.

### 3.2.3. Yapışkanlık Ölçümleri

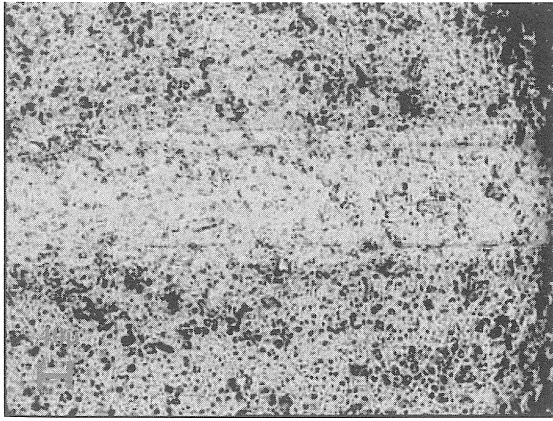
Kaplamaların yapışkanlık ölçümleri için çizik test cihazı kullanılmıştır. Testler lineer olarak artan yük altında yapılmıştır. Uygulanan yük 0,2 N dan başlayıp dakika da 100 N luk artışla 80 N a kadar çıkartılmıştır. Aşındırıcı uç olarak 200 µm çapında



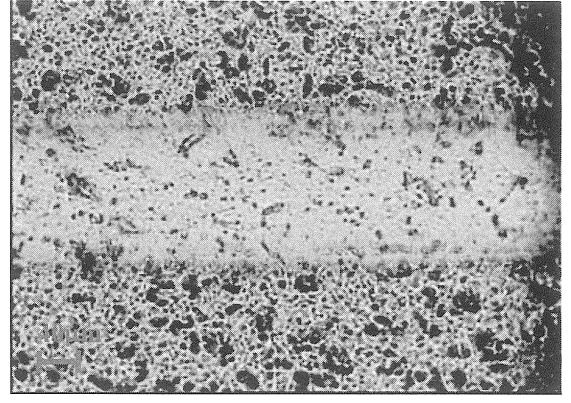
elmas kullanılmış ve 10 mm/s hızla hareket eden bu uçla kaplama yüzeyi 8 mm uzunluğunda çizilmiştir. Yükün artmasıyla birlikte elmas ucun nüfuz etme derinliği de artmıştır. 8 mm lik çizik sonunda yük 80 N olurken, kaplamanın yüzeyinden 50 µm içeri girilmiştir. Testler farklı deney parametrelerinde büyütülen örnekler için tekrarlanmıştır ve çiziklere ait birçok fotoğraf alınmıştır. Şekil 7. görülen 20 kere büyütülmüş fotoğraflardan da anlaşıldığı gibi 80 N yük altında dahi kaplamanın kenarlarında herhangi bir çatlak, kalkma veya yırtılma gözlemlenmemiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı parametrelerde yapılan çizik testleri için kritik yükler 20 ila 25 N arasında belirtilmiştir [21]. Bu sonuçlara göre ise çelik örneklerde üzerinde büyütülen bor nitür kaplamaların yapışkanlığının oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. BN filme ait sürtünme katsayısı



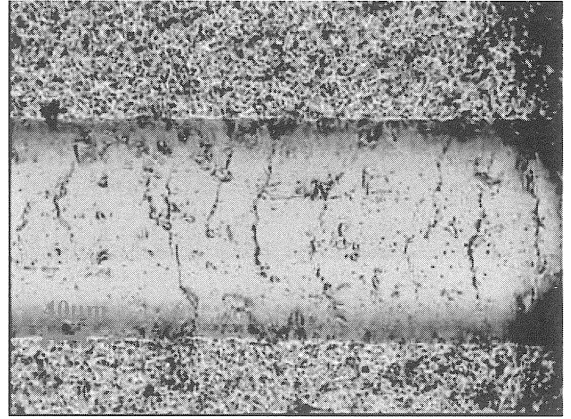
20 N yük altında



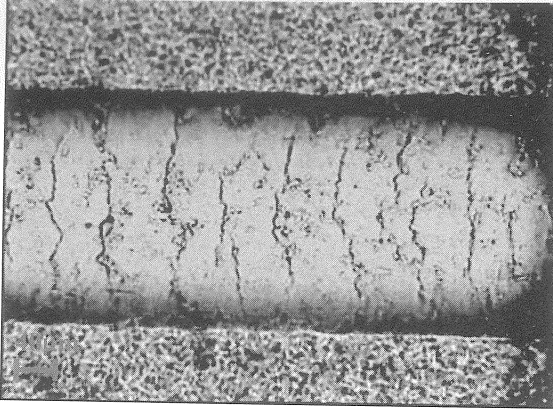
30 N yük altında



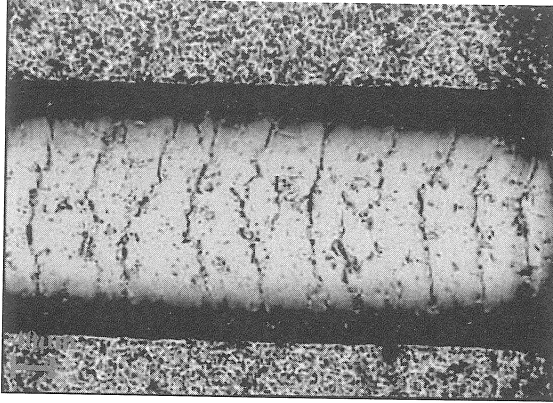
40N yük altında



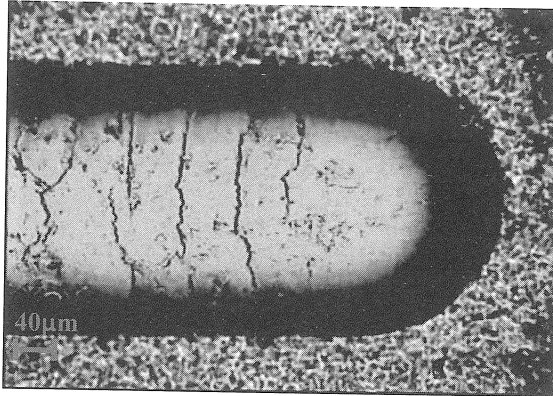
50 N yük altında



60 N yük altında



70 N yük altında



80 N yük altında

Şekil 7. Çizik testi sonucu oluşan izlerin gözlemlenmesi

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, bor nitrür filmler Silikon yonga plakalar ve çelik örnekler üzerinde rf magnetron saçırma yöntemiyle büyütülmüştür. Sinterlenmiş hekzagonal bor nitrür plaka hedef malzemesi olarak kullanılmıştır. Filmlerin karakterizasyonu göstermiştir ki, bor nitrür

kaplamalar hem silikon hem de çelik örnekler üzerinde başarıyla elde edilmiştir. FTIR sonuçlarına göre en yüksek kübik faz oranı 200 °C sıcaklıkta ve 200 V alt malzeme voltajı altında sağlanmıştır. Büyütme sürecinde yapılacak birkaç modifikasyonla bu oranı artırmak mümkündür. XPS sonuçlarına göre filmler stokiometrik olarak büyütülmüştür. Kalotest ölçümleri sonucu 2 saat deney sonucunda 0,5 µm kalınlığında kaplama oluştuğu anlaşılmıştır. Alümina malzemeye karşı ortalama sürtünme katsayısı 0,5 olarak ölçülmüştür. Aşınma ölçümlerine göre kaplamaların oldukça yüksek aşınma direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Yapışkanlık testleri kaplamaların yapışkanlığının yüksek olduğunu göstermiştir.

Kaplamaların değerlendirilmesine nano sertlik deneyleriyle devam edilecektir. Büyütme parametreleri kaplamaların uygulanabileceği alanlara göre optimize edilecektir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Yazarlar Ulusal Bor Araştırma Enstitüsüne, Türkiye Bilimsel ve Araştırma Kurumuna ve ODTÜ Merkezi Laboratuvarına teşekkür eder. Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Araştırma Kurumunca desteklenen 105M370 nolu proje çerçevesinde yürütülmüştür.

#### DEPOSITION OF BORON NITRIDE COATINGS ON STEEL SUBSTRATES BY RF MAGNETRON SPUTTERING

Boron nitride coatings have been deposited on Si and steel substrates by radio frequency (rf) magnetron sputtering technique from a hexagonal boron nitride target. Deposition process was carried out in an Ar and N<sub>2</sub> mixture environment having a ratio of 5 to 1, respectively at a total pressure of 3x10<sup>-3</sup> Torr. Main parameters were bias voltage and temperature in the deposition of boron nitride and the effect of these parameters were investigated. The objective of this study is to increase the fraction of cubic phase in coating in order to achieve high hardness and adhesion for the metal cutting applications. The characterizations of coatings were performed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-Ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Scanning Electron Microscopy (SEM) techniques. Mechanical properties of boron nitride coatings on steel substrates were determined by thickness, friction coefficient, wear and adhesion measurements.

Keywords: Boron Nitride Coating, Magnetron Sputtering, High Speed Steel

## KAYNAKÇA

1. Prouch J.-J., Alterovitz S.-A., Synthesis and Properties of Boron Nitride, Materials Science Forum, Vol 54&55 (1990), Trans Tech Publications.
2. Willa G., Perkins P.-G., Is there a new form of boron nitride with extreme hardness?, Diamond and Related Materials 10 (2001) 2010-2017.
3. Audronis M., Valiulis A.-V., Silickas P., Recent Developments in the Deposition of c-BN Coatings, ISSN 1392-1320 Materials Science (MEDŽIAGOTYRA), Vol. 10, No. 2. (2004)
4. Kimura Y., Wakabayashi T., Okada K., Wada T., Nishikawa H., Boron nitride as a lubricant additive, Wear 232\_1999.199-206.
5. Klages C.-P., Fryda M., Matthke T., Schsfer L., Dimigen H., Diamond and c-BN Coatings for Tools, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 16 (1998) 171-176.
6. Neo K.-S., Rahman M., Li X.-P., Khoo H.-H., Sawa M., Maeda Y., Performance evaluation of pure c-BN tools for machining of steel, Journal of Materials Processing Technology 140 (2003) 326-331.
7. Jin M., Watanabe S., Miyake S., Murakawa M., Trial fabrication and cutting performance of c-BN-coated taps, Surface and Coatings Technology 133-134 (2000) 443-447.
8. Zhou Z.-F., Bello I., Kremnican V., Fung M.-K., Lai K.-H., Li K.-Y., Lee C.-S., Lee S.-T., Formation of cubic boron nitride films on nickel substrates, Thin Solid Films 368 (2000) 292-296.
9. Deng J., Wang B., Tan L., Yan H., Chen G., The growth of cubic boron nitride films by RF reactive sputter, Thin Solid Films 368 (2000) 312-31.
10. Zhu P.-W., Zhao Y.-N., Wang B., He Z., Li D.-M., Zou G.-T., Prepared Low Stress Cubic Boron Nitride Film by Physical Vapor Deposition, Journal of Solid State Chemistry 2002 167, 420-424.
11. Ye J., Rothaar U., Oechsner H., Conditions for the formation of cubic boron nitride films by r.f. magnetron sputtering, Surface and Coatings Technology 105 (1998) 159-164.
12. Tzeng Y., Zhu H., Electron-assisted deposition of cubic boron nitride by r.f. magnetron sputtering, Diamond and Related Materials 8 (1999) 1402-1405.
13. Hu C., Kotake S., Suzuki Y., Senoo M., Boron nitride thin films synthesized by reactive sputtering, Vacuum 59 (2000) 748-754.
14. Zhao Y.-N., Wang B., Yu S., Tao Y.C., He Z., Li D.M., Zou G.T., Preparation of c-BN films by RF sputtering and the relation of BN phase formation to the substrate bias and temperature, Thin Solid Films 320 (1998) 220-222.
15. Jiang L., Fitzgerald A.-G., Rose M.J., Lousa A., Gimeno S., Formation of cubic boron nitride by r.f. magnetron sputtering, Surface Interface Analysis 2002 , 34, 732-734.
16. Yang T.-S., Tsai T.-H., Lee C.-H., Cheng C.-L., Wong M.-S., Deposition of carbon-containing cubic boron nitride films by pulsed-DC magnetron sputtering, Thin Solid Films 398-399 (2001) 285-290.
17. Bewilogua K., Keunecke M., Weigel K., Wiemann E., Growth and characterization of thick cBN coatings on silicon and tool substrates, Thin Solid Films 469-470 (2004) 86-91.
18. Bello I., Chan C.-Y., Zhang W.-J., Chong Y.-M., Leung K.-M., Lee S.-T., Lifshitz Y., Deposition of thick cubic boron nitride films: The route to practical applications", Diamond & Related Materials 14 , (2005) 1154-1162.
19. Bello I., Chong Y.-M., Leung K.-M., Chan C.-Y., Ma K.-L., Zhang W.-J., Lee S.-T., Layyous A., Cubic boron nitride films for industrial applications, Diamond & Related Materials 14 (2005) 1784 - 1790.
20. Yamamoto K., Keunecke M., Bewilogua K., Deposition of well adhering cBN films up to 2 mm thickness by B-C-N gradient layer system, Thin Solid Films 377-378 (2000)331-339.
21. Keunecke M., Bewilogua K., Wiemann E., Weigel K., Wittorf R., Thomsen H., Boron containing combination tool coatings- characterization and application tests, Thin Solid Fils 494 (2006) 58-62.

**Merve Erdal**

Yrd. Doç. Dr.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Ankara

**Hakan İpek**

Makine Y. Mühendisi

Oyak-Renault Otomobil  
Fabrikaları A.Ş.  
Bursa

**Hatice Sinem Şaş**

Arş. Gör.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Ankara

# İleri Kompozit Malzemelerin Reçine Transfer Kalıplama Yöntemiyle Üretiminde Kalıp İçi Reçine Akışının Modellenmesi

*Bu makalede, reçine transfer kalıplama yöntemi sırasında reçinenin elyaf içindeki akışının benzetimi için geliştirilen, Darcy kanunu temelli matematiksel model ve sayısal çözüm yöntemi sunulmuştur. Geliştirilen model, karmaşık şekilli kalıplar için 2-boyutlu, eşyönlü/eşyönsüz reçine akışını izotermal olarak modellemektedir. Dolum süresi, kalıp içi basınç dağılımı, akış cephesinin ilerlemesi gibi kalıp ve üretim tasarımı için önemli veriler elde edilebilmektedir. 1 boyutlu akış konfigürasyonu için sayısal ve analitik çözümler karşılaştırılmış, çeşitli süreç değişkenlerinin üretime etkisi incelenmiştir. Karmaşık şekilli kalıp içi 2boyutlu dolum analizi yapılmış, sayısal sonuçlar önceki bildirişlerdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modelin, karmaşık şekilli ve eşyönsüz elyaf preform içi reçine akışının benzetiminde tatmin edici doğrulukta sonuçlar verdiği gözlenmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Reçine transfer kalıplama, Gözenek içi akış modellemesi, Sayısal analiz*

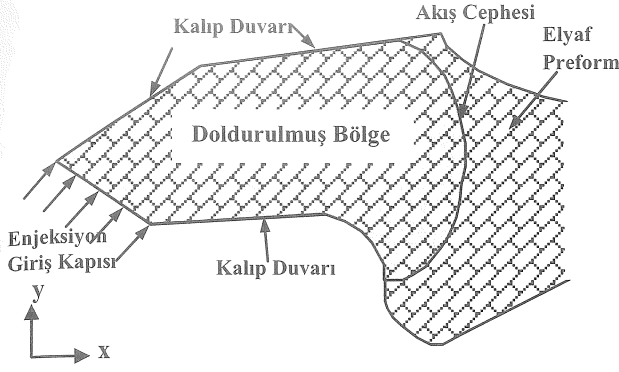
## TERİMLER

$\vec{V}$	yüzeysel (Darcy) hız vektörü
$\vec{V}'$	gerçek hız vektörü
$\varepsilon$	gözeneklilik oranı (preform boşluk hacmi/kalıp kovuğu hacmi)
$v_f$	elyaf hacim oranı (preform elyaf hacmi/ kalıp kovuğu hacmi, $\varepsilon = 1 - v_f$ )
$\underline{\underline{K}}$	geçirgenlik tensörü
$\psi$	akım fonksiyonu
$\mu$	reçine viskozitesi
$u_0$	yüzeysel giriş enjeksiyon hızı (m/s)

## GİRİŞ

Reçine transfer kalıplama yöntemi ("resin transfer molding"- RTM), özellikle karmaşık şekilli, kesintisiz

elyafla güçlendirilmiş, yapısal kompozit malzeme üretiminde kullanılan ileri bir üretim tekniğidir. RTM, şekilsel olarak karmaşık yapıya sahip, üstün mekanik performanslı, hafif parçaların üretimi için uygundur. Bu üretim yönteminde, ürün kalitesinde oluşabilecek değişkenlik, diğer kompozit üretim yöntemlerine göre daha iyi kontrol edilebilir (yüksek tekrarlanabilirlik) [1,2]. Üretilecek parça için tasarlanmış kalıp yuvasına, örgülü/örgüsüz elyaf kumaş katmanları, parçanın istenilen mekanik özelliklerine göre belirlenen elyaf hacim oranlarında ve yönlerinde yerleştirilir. Şekil 1'de görüldüğü gibi elyaf preform (üretilecek ürünün şekline göre kesilip hazırlanan elyaf bütünü) yerleştirildikten sonra kalıp kapatılır ve termoset plastik reçine basınç uygulanarak kalıbın içine enjekte edilir. Katalize edilmiş reçinenin kalıba dolumu sona erince, reçinenin polimerize olarak katlaşması için kalıp fırınlanır. Oluşturulan kompozit malzemede, reçine matrisi, yükün yük taşıyıcı elyaflar arasında iletimini sağlar ve ürüne katı şeklini verir [3].



Şekil 1. RTM yönteminde enjeksiyon aşaması

RTM yönteminde preformun reçineyle emdirilmesinin ve kalıbın dolununun benzetimi yapılarak süreç parametreleri için ön bilgi elde edilir. Kalıp yuvasının tamamen dolumu, kalıp içi basınç dağılımı, (istenmeyen) hava kabarcıklarının oluşumu gibi bilgilerin kalıp içi reçine akışının benzetimi ile elde edilmesi, hem üretim hem de malzeme maliyeti yüksek olan bu yöntemde tasarım sürecindeki verimi artırır. Bunun yanında kompozit malzemenin ve planlanan üretim sürecinin önemli özellikleri (hava boşluklarının oluşumu, yerleri, dolum basıncı, dolum zamanı, vb.) geliştirilebilir.

Bu çalışmada preform içi reçine akışı ve kalıbın doldurulması, Newtonian akış özellikleri gösteren bir reçine için 2-boyutlu, sanki-durağan ("quasi-steady") ve izotermal olarak modellenmiştir. RTM yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin kalınlıkları, yüzey alanı boyutlarına göre çok küçüktür. Bu nedenle akışta üçüncü boyutun (kalınlık yönünde) ihmal edilmesi, RTM süreç modellemesinde sıkça kullanılan bir yaklaşımdır. Darcy kanunu temel alınarak geliştirilen model, karmaşık şekle sahip kalıp içi dolunun, tek veya birden fazla kapılı enjeksiyon için benzetimini yapabilmektedir. Model aynı zamanda, hem eşyönlü ("isotropic") hem eşyönsüz (anisotropic") elyaf preform için reçine doldurulmasını modelleyebilmektedir.

Geliştirilen modelle RTM yönteminde kalıp içi akış sırasında süreç parametrelerinin akışa olan etkileri, 1boyutlu parametrik analiz çalışmalarıyla incelenmiştir. Sayısal çözümün doğruluğunun incelenmesi için, 1 boyutlu analitik çözümle sayısal çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, 2 boyutlu karmaşık şekle sahip kalıp içi eşyönsüz akış benzetimi yapılmış ve sonuçlar önceki bildirişlerdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

## PROBLEMİN FORMÜLASYONU

RTM yönteminde kalıbın içine reçine aktarımı ve reçinenin örgülü/örgüsüz elyaf preform içinde ilerleyişi, gözenekli yapı içi akıştır ve makroskopik düzeyde, Darcy kanunu ile modellenebilir [1,4-7]. Darcy kanunu iç kuvvetlerin ihmal edildiği bir yaklaşımla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{V} = -\frac{1}{\mu} \underline{\underline{K}} \cdot \nabla P \quad (1)$$

Burada  $\vec{V}$  yüzeysel (Darcy) hız,  $P$  akış basıncı,  $\mu$  reçine viskozitesi ve  $\underline{\underline{K}}$  preformun yönsel geçirgenlik tensörüdür. Preform içi ilerleyen reçinenin gerçek hızının ( $\vec{V}'$ ), yüzeysel hız ile arasındaki bağıntı, gözeneklilik oranı  $\varepsilon$  veya elyaf hacim oranına,  $v_f$  göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V' = \frac{V}{\varepsilon} = \frac{V}{1 - v_f} \quad (2)$$

Kartezyen koordinatta simetrik geçirgenlik tensörü aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\underline{\underline{K}} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Geçirgenlik tensörünün  $K_{ij}$  elemanı,  $j$  yönündeki basınç gradyanının  $i$  yönündeki akış hızına olan etkisini ifade eder.

2 boyutlu akış analizi için geçirgenlik tensörü aşağıdaki gibi sadeleşir.

$$\underline{\underline{K}} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Kartezyen koordinat sistemi, geçirgenlik tensörünün asal eksenleri ("principal axes") ile çakıştırılarak geçirgenlik tensörü aşağıdaki gibi diyagonal matris haline getirilir.

$$\underline{\underline{K}} = \begin{pmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2 boyutlu akış analizinde denklem (1)'deki Darcy kanununun açılmış hali kullanılarak hız bileşenleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$u = -\frac{K_{xx}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (6.a)$$

$$v = -\frac{K_{yy}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (6.b)$$

Süreklilik denklemi sıkıştırılmayan akışkanlar için akım fonksiyonu yoluyla aşağıdaki eşitlikler ile tanımlanabilir.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (7.a)$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (7.b)$$

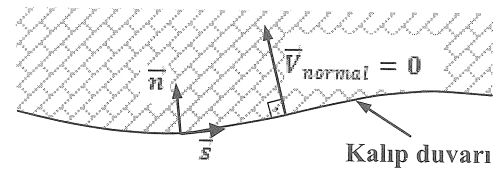
Denklem (6) ve denklem (7) birleştirilir ve basınç gradyanları çapraz türevle elenerek, temel denklem, akım fonksiyonu cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} & \frac{\mu}{K_{yy}} \frac{\partial \psi^2}{\partial x^2} + \frac{\mu}{K_{xx}} \frac{\partial \psi^2}{\partial y^2} \\ & + \left[ \frac{1}{K_{xx}} \frac{\partial \mu}{\partial y} - \frac{\mu}{K_{xx}^2} \left( \frac{\partial K_{xx}}{\partial y} \right) \right] \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ & + \left[ \frac{1}{K_{yy}} \frac{\partial \mu}{\partial x} - \frac{\mu}{K_{yy}^2} \left( \frac{\partial K_{yy}}{\partial x} \right) \right] \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (8)$$

Denklem (8), preform içinde Newtonian reçinenin 2 boyutlu, izotermal, sanki-durağan akışının temel denklemdir.

Akış probleminin temel denklemi, (8), eliptik karakterde olduğu için, akış alanının bütün sınırları için sınır koşulları tanımlanmalıdır. Akış alanında 3 farklı sınır çeşidi olabilir. Bu sınırlar reçinenin temas ettiği kalıp duvarı, reçinenin giriş (enjeksiyon) kapısı ve ilerleyen akış cephesidir. Problemin temel denklemi akım fonksiyonu ile belirtildiği için sınır koşulları da akım fonksiyonu cinsinden tanımlanmalıdır. Reçinenin kalıp kenarı boyunca kaydığı ("slip condition") varsayılarak kalıp duvarının reçine ile temas eden kısmı bir akım çizgisi olarak kabul edilir. Şekil 2'de kalıp duvarı için duvar koordinatları ( $\vec{s}$  ve  $\vec{n}$ )

tanımlanmış ve duvara dik hız ( $\vec{V}_{normal}$ ) gösterilmiştir.



Şekil 2. Kalıp duvarı için sınır koşulu

Bu durumda, kalıp duvarlarının reçine ile teması için duvar boyunca akım fonksiyonu sabit kalacaktır.

$$\psi_{kalıp\_duvarı} = \psi_0 \quad (9)$$

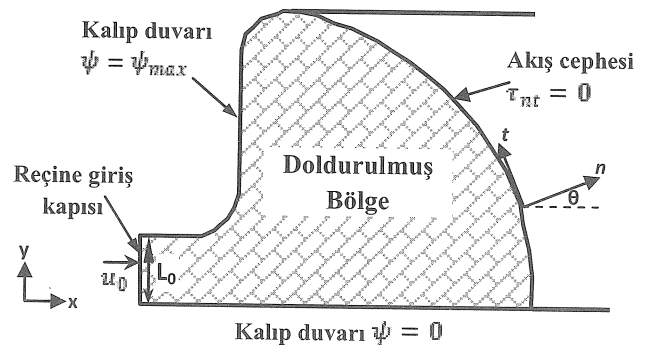
Denklem (9)'un türevi alınarak kalıp duvarları için modelde kullanılan sınır koşulu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial \psi}{\partial s} = V_{normal} = 0 \quad (10)$$

Reçine giriş kapısı boyunca reçine giriş basıncı ya da reçine giriş hızı tanımlanır. Bu çalışmada verilen akış debisinden, giriş kapısı için sınır koşulu olarak sabit akış debisi tanımlanmıştır. Verilen akış debisinden, giriş hızlarının bileşenleri ( $u$  ve  $v$ ) bulunur. Giriş hızlarına bağlı olarak giriş kapısındaki akım fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\psi = \int u dy - \int v dx \quad (11)$$

Reçine giriş (enjeksiyon) kapısı y-ekseni ile çakıştırıldığında giriş hızının y-ekseni yönündeki bileşeni,  $v$ , sıfır olur (Şekil 3).



Şekil 3. Sınır koşulları



Buna göre giriş kapısındaki akım fonksiyonu hesabı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\psi_{giriş}(0, y) - \psi_{giriş}(0, 0) = \int_0^y u_{giriş}(0, y) dy \quad (12)$$

x-ekseni yönündeki sabit gerçek giriş hızı  $\bar{u}_{giriş}$  olarak ifade edilirse, giriş kapısındaki akım fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$\psi_{giriş}(y) - \psi_{giriş, y=0} = \bar{u}_{giriş} \cdot y \quad (13)$$

x-ekseni boyunca yüzeysel hız (Darcy hızı),  $u_0$  aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$u_0 = \varepsilon \cdot \bar{u}_{giriş} \quad (14)$$

Bu durumda giriş kapısı boyunca akım fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\psi_{giriş}(y) = \frac{u_0}{\varepsilon} y \quad (15)$$

Giriş kapısının alt noktasında ( $y = 0$ ) akım fonksiyonu değeri 0 alınmıştır (Şekil 3). Giriş kapısının boyu  $L_0$  ile ifade edilerek giriş kapısı boyunca akım fonksiyonunun maksimum değişimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta\psi_{max} = \psi_{giriş}(L_0) - \psi_{giriş, y=0} = \frac{u_0}{\varepsilon} L_0 \quad (16)$$

Temel denklemde ve sınır koşullarındaki tüm akım fonksiyonu değerleri, akım fonksiyonunun maksimum değişimi ile ölçeklendirilir ve akış alanı içindeki tüm akım fonksiyon değerleri 0 ve 1 arasında değişir. Buna göre giriş kapısındaki akım fonksiyonu, ölçeklendirilmiş olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\psi_{giriş}^*(y) = \frac{\psi_{giriş}}{\Delta\psi_{max}} = \frac{u_0}{\varepsilon} y \frac{1}{\frac{u_0}{\varepsilon} L_0} = \frac{y}{L_0} \quad (17)$$

Kalıp duvarı için tanımlanan sabit akım fonksiyonu değerleri de (denklem (9)) aynı şekilde ölçeklendirildiği zaman 0 ve 1 değerleri arasında değişir.

Reçine kalıp içine dolduruldukça sıkıştırılan hava kalıptaki hava kanallarıyla dışarı atılmaktadır. İlerleyen akış cephesi bir serbest yüzey olduğu için akış cephesi üzerinde herhangi bir kayma kuvveti oluşmadığı varsayılır [8] ve bu durum aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\tau_{nt} = \mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sin 2\theta - \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \cos 2\theta \right] = 0 \quad (18)$$

Şekil 3'te de görüldüğü gibi  $\theta$ , serbest yüzeydeki (akış cephesindeki) yüzey normali ile Kartezyen koordinat sisteminin x-ekseni arasındaki açıdır. Denklem (18)'de hız bileşenleri akım fonksiyonu cinsinden ifade edilerek, serbest cephe (akış cephesi) sınır koşulu elde edilir.

Preform içinde ilerleyen reçinenin akış modellemesi için gerekli 3 farklı sınır koşulu Şekil 3'te gösterilmiş ve denklem (10), (17) ve (18) ile akım fonksiyonu cinsinden ifade edilmiştir.

### SAYISAL ÇÖZÜM

RTM yönteminin benzetimi, tanımlanmış reçine giriş akış debisiyle reçinenin preform içine emdirilmesinin ve kalıbın doldurulmasının akış cephesi takibiyle yapılmasını kapsamaktadır.

Düzgün şekilli kalıp konfigürasyonlarında bile enjeksiyon sırasında ilerleyen serbest akış cephesinin oluşturduğu akış alanı karmaşık şekilli bir çözüm alanı oluşturmaktadır. Bu durumda birçok akış senaryosu için analitik çözüm yapılması mümkün olmamaktadır.

Karmaşık şekle sahip parçaların RTM yöntemiyle üretiminde preform içi reçine akışının benzetimi sayısal çözüm şekli açısından iki yöntemle yapılabilir. Birinci yöntemde kalıp kovuğu sabit bir hesaplama ağı ile kaplanır [3,9]. Hesaplama ağındaki her eleman için bir doluluk oranı değeri atanır. Doluluk oranı 0 ile 1 arasında değişen değerler alır. Doluluk oranının 1 olması elemanın reçine ile tamamen doldurulduğunu, 0 olması ise henüz içinde tamamen hava olduğunu ifade eder. 0 ile 1 arasındaki bir doluluk oranı ise reçinenin, o elemanı belirtilen oranda doldurduğunu ve akış cephesinin elemanın içinde olduğunu ifade eder. Bu yöntemde tek bir hesaplama ağında tek bir doğrusal denklem sisteminin çözülmesi gerekir. Bu sebeple sabit ağ kullanımı

hesaplama zamanı açısından avantaj sağlar. Fakat akış cephesinin ilerlemesinin doğru bir şekilde yapılması hesaplama ağındaki elemanların küçüklüğüne bağlıdır. İkinci sayısal çözüm yöntemi olan dinamik hesaplama ağı içeren çözümlerde ise her bir zaman adımında çözüm ağı reçinenin doldurulmuş olduğu kısım için tanımlanır ve her bir zaman adımında yeni hesaplama ağı oluşturulur [2,4,8,10].

Bu çalışmada, dinamik hesaplama ağı kullanılarak sayısal çözüm gerçekleştirilmiş; karmaşık şekilli çözüm alanı, sınıra uydurulmuş koordinat sistemine ("boundary fitted coordinate system") taşınmıştır [11]. Bu yöntemle, preform boyunca ilerleyen reçinenin doldurduğu kısım ile oluşan çözüm alanı (x-y koordinat sistemi), düzgün şekilli bir hesaplama alanına ( $\xi$ - $\eta$  koordinat sistemi) aktarılır (Şekil 4). Çözüm sırasında, her bir zaman adımı için yeni bir akış alanı oluşturulduğu için, yeni bir hesaplama alanı da oluşturulur. Çözüm, düzgün hesaplama alanında gerçekleştirileceği için, temel denklem (denklem (8)) ve sınır koşulları (denklem (10), (17) ve (18)) da, hesaplama alanı koordinat değişkenleri ( $\xi$ - $\eta$ ) cinsinden ifade edilmelidir.

Fiziksel ve hesaplama alanlarının koordinat sistemleri arasında ilişki eliptik, hiperbolik veya parabolik kısmi denklemlerle ifade edilebilir. Bu çalışmada sınırlardaki süreksizlik ve tekillik gibi

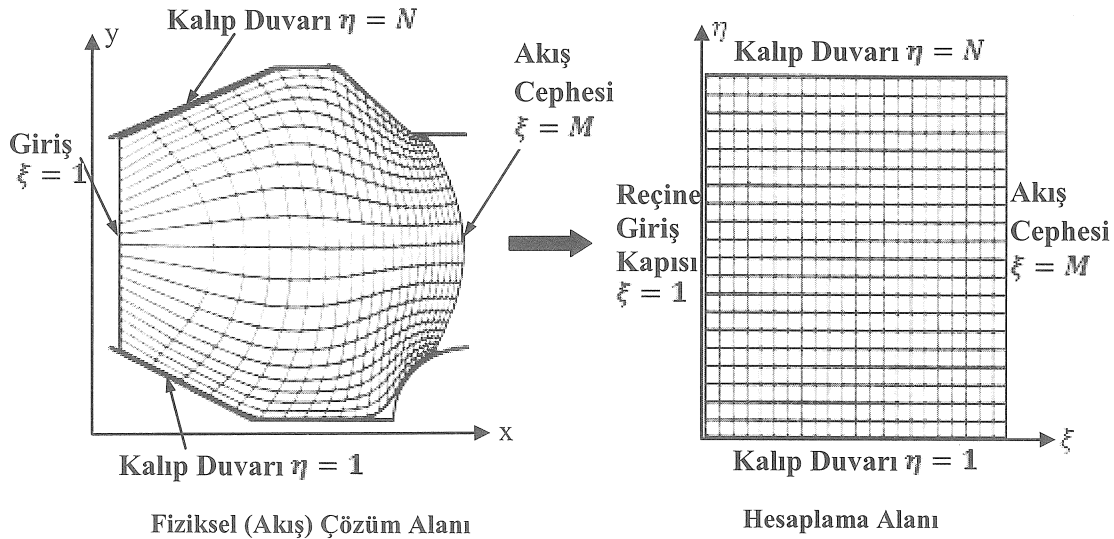
sayısal problemlere karşı daha iyi sonuçlar elde edilen eliptik ağ oluşturma (grid üretim) yöntemi kullanılmıştır [4-5,10]. 2-boyutlu problem için Poisson-tipi eliptik ağ oluşturma denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = P(\xi, \eta) \quad (19.a)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q(\xi, \eta) \quad (19.b)$$

Denklem (19)'da kullanılan  $P(\xi, \eta)$  ve  $Q(\xi, \eta)$  ağ (grid) kontrol fonksiyonlarıdır ve fiziksel çözüm alanındaki hesaplama noktalarının dağılımının düzenlenmesinde kullanılırlar. Problemin fiziksel çözüm alanından Kartezyen hesaplama koordinat sistemine taşınmasında  $P$  ve  $Q$  fonksiyonları sıfır olarak alınmıştır.

Sınıra uydurulmuş koordinat sistemini düzensiz şekilli geometrilerde kullanabilmek için temel denklemin ve sınır koşullarının hesaplama alanına taşınması gerekmektedir. Akış alanındaki 4 adet sınır koşulu (2 kalıp duvarı, reçine giriş kapısı ve akış cephesi) Şekil 4'te gösterilen hesaplama alanına taşınır.



Şekil 4. RTM yönteminde fiziksel çözüm alanının sınıra uydurulmuş koordinat sistemi ile hesaplama alanına taşınması



Temel denklem (denklem (8)) de hesaplama alanına taşınarak  $\xi$  ve  $\eta$  değişkenleri cinsinden ifade edilmektedir. Örneğin, fiziksel çözüm alanında tanımlı  $f(x, y)$  fonksiyonunun birinci dereceden kısmi türevleri, hesaplama alanı koordinat sisteminin değişkenleri  $\xi$  ve  $\eta$  cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f_x = f_{\xi} \xi_x + f_{\eta} \eta_x \quad (20.a)$$

$$f_y = f_{\xi} \xi_y + f_{\eta} \eta_y \quad (20.b)$$

Koordinat taşınmasında Jakoben, J, aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$J = x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi} \quad (21)$$

Denklem (20), Jakoben tanımı kullanılarak aşağıdaki hale getirilir.

$$f_x = \frac{1}{J} f_{\xi} y_{\eta} - f_{\eta} y_{\xi} \quad (22.a)$$

$$f_y = \frac{1}{J} - f_{\xi} x_{\eta} + f_{\eta} x_{\xi} \quad (22.b)$$

Denklem (22) kullanılarak temel denklem ve sınır koşullarındaki türevler,  $(\xi, \eta)$  değişkenleriyle ifade edilir ve çözüm hesaplama alanı koordinat düzleminde yapılır. Denklemlerin dönüştürülmüş bu halleri, akım fonksiyonunun hesaplama alanındaki çözümünde kullanılacak denklemlerdir. Düzgün hesaplama alanındaki her bir nokta, birebir olarak fiziksel (akış) çözüm alanındaki tek bir noktayla eşleştirilmiştir ( $(\xi(x, y)$  ve  $\eta(x, y)$  bilinmektedir).

Düzgün şekilli hesaplama alanına taşınan temel denklem ve sınır koşulları sayısal çözüm uygulanması için ayrık hale getirilir. Bu çalışmada temel denklemin ve sınır koşullarının ayrıklaştırılması sonlu fark ("finite difference") yöntemiyle yapılmıştır. Ayrık hale getirilmiş temel denklem ve sınır koşulları bütün hesaplama noktaları için ifade edilir ve akım fonksiyonunun çözümünde kullanılacak doğrusal cebirsel denklem sistemi oluşturulur. Oluşturulan doğrusal denklem sistemi ardışık-aşırı-rahlatma ("successive over relaxation, SOR") yöntemi

kullanılarak, akım fonksiyonu için çözülür. Geliştirilen modelin sayısal çözümü, Fortran derleyicisi kullanılarak yazılan programla gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen programın akış şeması Şekil 5'te sunulmuştur.

## MODELLEME SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Süreç değişkenlerinin sürece olan etkisinin incelenmesi için 1 boyutlu akış analizleri yapılmıştır.

Şekil 6'da boyutları verilen düz kanal için sayısal ve analitik çözümler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İncelenen kalıbın en-boy oranı küçük olduğu için ve enjeksiyonun tüm kalıp eni boyunca ("line-gate") yapılması nedeniyle analiz 1 boyutlu kabul edilmiş ve analitik çözüm bu şekilde yapılmıştır. Sayısal çözüm, 2 boyutlu gerçekleştirilmiş ve analitik çözümle karşılaştırılan sonuçlar düz kanalın x-yönündeki merkez çizgisi boyunca alınmıştır.

Sabit  $u_0$  yüzeysel hızıyla enjekte edilen reçinenin 1 boyutlu akışının analitik çözümü bulunabilir. Elyaf preform içindeki reçinenin gerçek akış hızı  $\frac{u_0}{1-v_f}$  dir ve bu hız akış alanı boyunca sabittir. Akış cephesi konumu,  $x_L$ 'in, zamana bağlı ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$x_L = \frac{u_0}{1-v_f} \cdot t \quad (23)$$

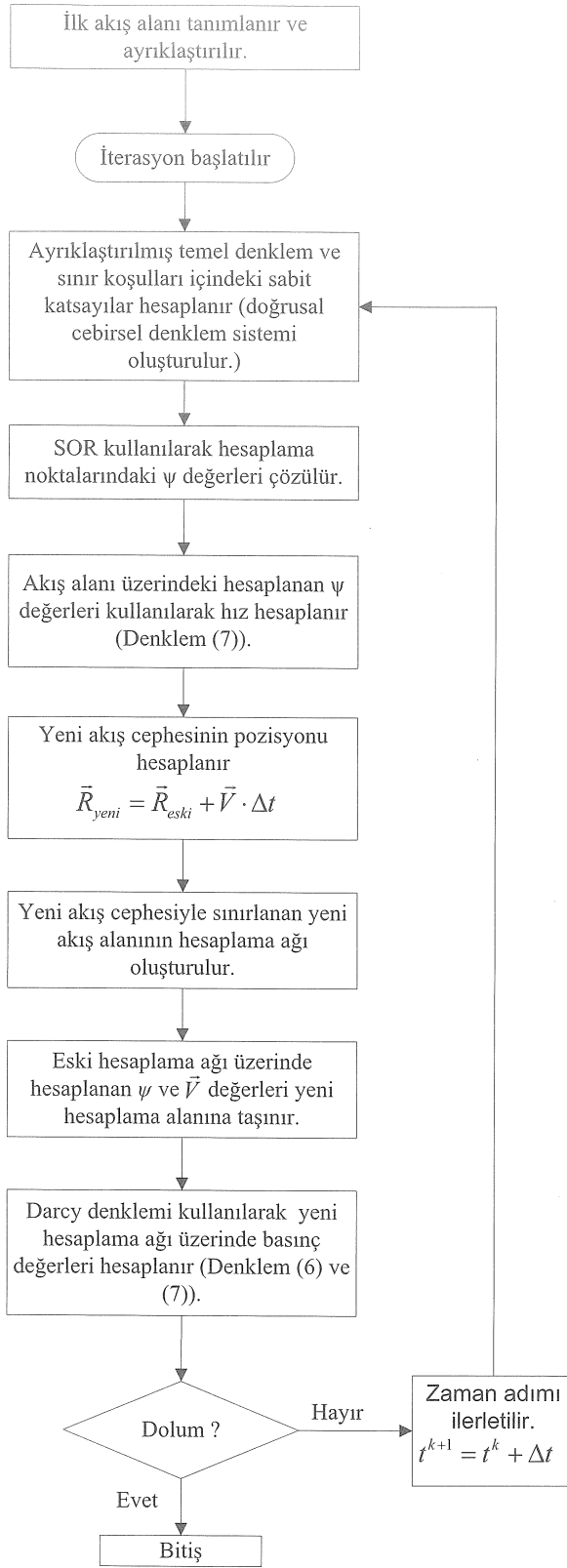
Denklem (23)'te  $t$  geçen süreyi ifade eder.

Denklem (1) ile verilen Darcy kanununun 1 boyutlu akış için basitleştirilmiş halinin integrali alındığında akış alanındaki her bir  $x$  konumundaki basınç değeri aşağıdaki gibi bulunur.

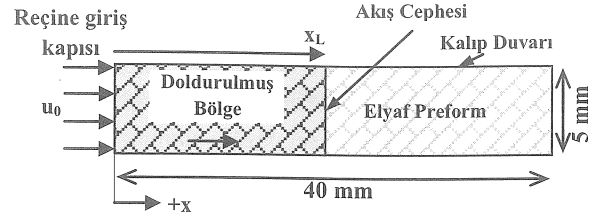
$$P(x) = \frac{\mu \cdot u_0}{K_{xx}} (x_L - x) \quad (24)$$

Enjeksiyon kapısındaki ( $x = 0$ ) basınç değeri denklem (24) kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{giriş} = \frac{\mu}{K_{xx}} u_0 x_L \quad (25)$$



Şekil 5. Program Akış Şeması



Şekil 6. 1-boyutlu analiz için kalıp ve kapı konfigürasyonu

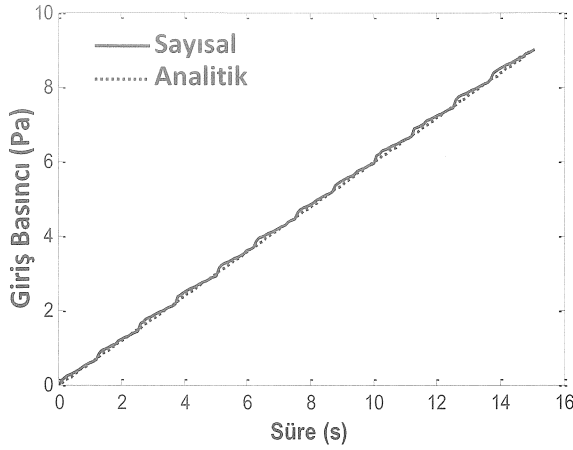
Denklem (25) kullanılarak hesaplanan giriş kapısındaki basınç değeri (analitik çözüm), geliştirilen program ile bulunan giriş kapısının orta noktasındaki basınç değeri ile karşılaştırılmıştır. 1 boyutlu dolum sürecinin analitik çözümü ve benzetimi için kullanılan süreç parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'de ve Şekil 7'de giriş basıncının zamana göre dağılımının analitik ve sayısal çözüm sonuçları verilmiştir. Tablo 1'deki dolum süreleri ve Şekil 7'deki giriş basıncının zamana bağlı değişimi incelendiğinde, analitik ve geliştirilmiş programdan elde edilen sonuçların eş olduğunu görülmektedir.

Beklendiği gibi, sabit enjeksiyon hızında, giriş basıncı doğrusal olarak artmaktadır ve bu artış analitik olarak da denklem (25) ile ifade edilmektedir. 1 boyutlu kalıp içi reçine akışı için sayısal ve analitik sonuçlarda, dolum süreleri de eşdeğer çıkmıştır.

Tablo 1. 1-boyutlu akış çözümü için kullanılan süreç parametreleri ve modelleme sonuçları

Giriş hızı, (mm/s)	1
Reçine viskozitesi, $\mu$ , (Pa.s)	1.149
Geçirgenlik, $K_{xx}$ , ( $m^2$ )	$38.37 \times 10^{-2} m^2$
Zaman adımı, $\Delta t$ (s)	0.1
Elyaf Hacim Oranı, $v_f$ (%)	50
Dolum Süresi, Analitik, (s)	15
Dolum Süresi, Sayısal, (s)	15



Şekil 7. 1-boyutlu reçine enjeksiyonunun sayısal ve analitik çözüm için giriş basıncındaki değişim

**Geçirgenlik ( $K_{xx}$ ):** 1-boyutlu RTM'de elyaf preform geçirgenliğinin ( $K_{xx}$ ) akışa etkisi incelenmiştir. Tablo 2'de verilen üç farklı geçirgenlik değeriyle üç ayrı benzetim yapılmıştır. Benzetimler sırasında kullanılan diğer süreç parametreleri, Tablo 1'de verildiği gibidir.

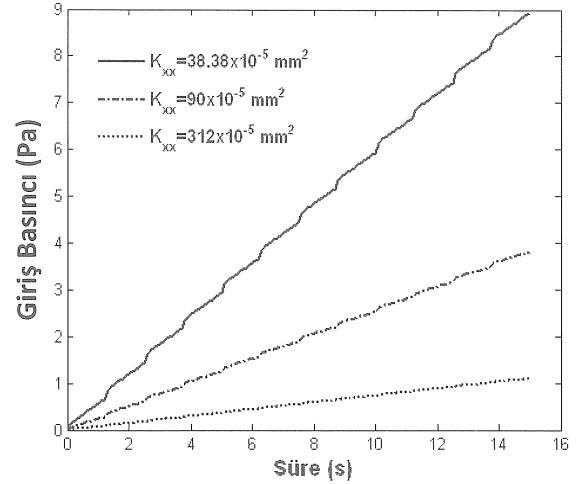
Dolum zamanı Tablo 2'de, giriş basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Giriş hızı ve elyaf hacim oranı değişmediği için dolum süresi geçirgenlik değeri ile değişmemektedir. Şekil 8'de görüldüğü gibi giriş basıncındaki zamana bağlı artış geçirgenlik sabitinin değeri arttıkça azalmaktadır. Geçirgenlik değeri azaldıkça reçinenin preforma nüfuz etmesi zorlaşmakta, reçinenin karşı gelmesi gereken basınç artmaktadır.

Tablo 2. 1-boyutlu geçirgenlik analizi için geçirgenlik değerleri ve modelleme sonuçları

	1	2	3
Geçirgenlik $K_{xx} \times 10^{-5} (\text{mm}^2)$	38.38	90	312
Dolum anındaki giriş basıncı (Pa)	8.94	3.81	1.09
Dolum zamanı (s)	15	15	15

**Enjeksiyon Hızı ( $u_0$ ):** Farklı enjeksiyon hızlarının (giriş hızı) akışa olan etkisi, 1-boyutlu akış konfigürasyonu için incelenmiştir. Tablo 3'de benzetimlerde kullanılan süreç parametre değerleri verilmiştir. Dört farklı giriş hızı için yapılan benzetimlerin sonucunda bulunan dolum anındaki giriş

basıncı ve dolum zamanı Tablo 3'te verilmiştir. Şekil 9'da farklı giriş hızları için giriş basıncının zamana göre değişimi sunulmuştur.

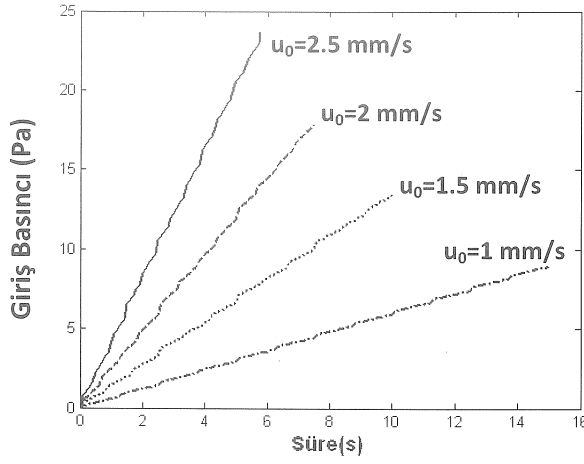


Şekil 8. 1-boyutlu akış için farklı geçirgenlik değerlerinde giriş basıncındaki değişim

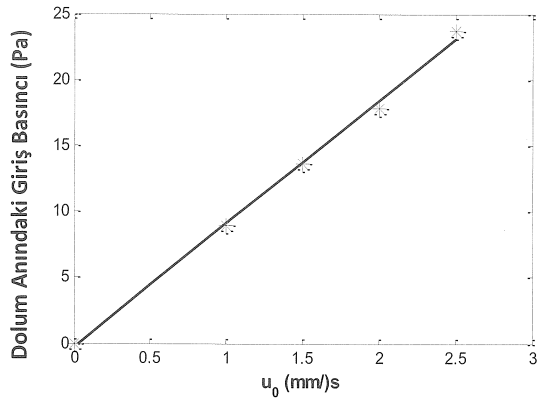
Tablo 3'te ve Şekil 9'da görüldüğü gibi enjeksiyon hızı artırıldıkça dolum süresi kısalmakta ve giriş basıncı artmaktadır. Denklem (25)'e göre, giriş basıncı giriş hızıyla doğrusal olarak değişmelidir. Şekil 10'da görüldüğü gibi, sayısal çözümde giriş basıncı-enjeksiyon hızı arasındaki bağıntı doğrusallıktan az miktarda sapmaktadır. Bu analizlerde, program 2-boyutlu bir kalıp şekli için çözüm yapmaktadır. Sunulan sonuçlar, kalıp kanalının x-yönündeki merkez çizgisi boyunca verilmiştir. Kalıp eni boyunca sayısal çözüm sonuçları az da olsa bir farklılık göstermektedir. Şekil 10'daki görülen doğrusallıktan sapmanın bu nedenle oluştuğu düşünülmektedir.

Tablo 3. 1-boyutlu hız analizi için süreç parametreleri ve modelleme sonuçları

Geçirgenlik $K_{xx} \times 10^{-5} (\text{mm}^2)$	38.37			
Zaman adımı, $\Delta t$ (s)	0.1			
Elyaf hacim oranı, $v_f$ , (%)	50			
Reçine viskozitesi, $\mu$ (Pa.s)	1.149			
Giriş hızı, $u_0$ (mm/s)	1.0	1.5	2.0	2.5
Dolum anındaki giriş basıncı (Pa)	8.94	13.67	17.87	23.69
Dolum zamanı (s)	15	10	7.5	6



Şekil 9. 1- boyutlu akış için farklı giriş hızlarında giriş basıncındaki değişim



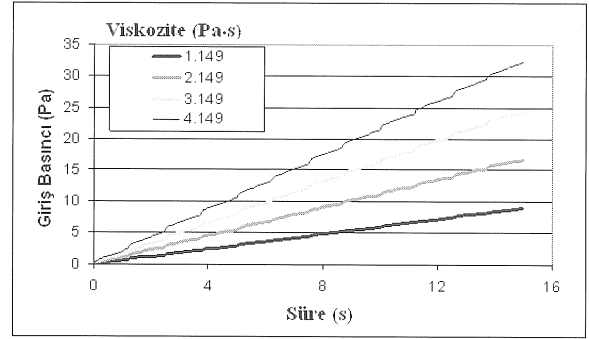
Şekil 10. 1-boyutlu akışta farklı giriş hızları için dolum anındaki giriş basıncı

**Viskozite ( $\mu$ ):** Farklı reçine viskozitelerinin akışa olan etkisi, 1-boyutlu akış konfigürasyonu için incelenmiştir. Dört farklı viskozite değeri için benzetim yapılmıştır. Analiz parametreleri ve benzetim sonuçları Tablo 4'de sunulmuş ve grafiksel olarak da Şekil 11'de gösterilmiştir.

Giriş hızları ve elyaf hacim oranı sabit tutulduğu için dolum süresinde bir farklılık gözlenmezken, viskozite arttıkça dolum anındaki giriş basınç değerlerinde değişim görülmüştür. Reçine viskozitesi artırıldıkça, preformun reçine ile emdirilmesi zorlaşmaktadır. Bu sebeple dolum anındaki giriş basıncı reçine viskozitesi ile aynı oranda artar. Bu artış, analitik çözümde öngörüldüğü gibi (denklem (25)) doğrusaldır.

Tablo 4. 1-boyutlu viskozite analizi için süreç parametreleri ve modelleme sonuçları

Giriş Basıncı, $u_0$ (mm/s)	1.0			
Geçirgenlik, $K_{xx} \times 10^{-5}$ (mm <sup>2</sup> )	38.38			
Zaman adımı, $\Delta t$ (s)	0.1			
Elyaf hacim oranı, $v_f$ (%)	50			
Reçine viskozitesi, $\mu$ , (Pa.s)	1.149	2.149	3.149	4.149
Dolum anındaki giriş basıncı (Pa)	8.94	16.73	24.51	32.29
Dolum zamanı (s)	15	15	15	15



Şekil 11. 1-boyutlu akış için farklı viskozite değerlerinde giriş basıncındaki değişim

**Elyaf hacim oranı ( $v_f$ ):** Farklı elyaf hacim oranlarının akışa olan etkisi, 1-boyutlu akış konfigürasyonu için incelenmiştir. Analiz parametreleri ve sonuçlar Tablo 5'de sunulmuş ve grafiksel olarak da Şekil 12'de gösterilmiştir.

Elyaf hacim oranının artırılmasıyla, kalıp kovuğunun içindeki boş hacim azalmaktadır. Bu nedenle elyaf hacim oranı artırıldığında aynı boyutlardaki kalıbın dolumu için daha az reçine gerekmektedir. Şekil 12'de görüldüğü gibi aynı enjeksiyon hızında, elyaf hacim oranı arttıkça dolum süresi azalır.

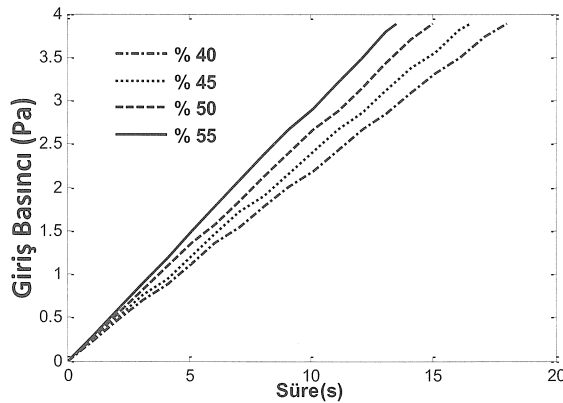
Elyaf hacim oranı arttıkça, basınç eğrisinin eğimi beklenildiği gibi artmıştır. Elyaf hacim oranı yükseldikçe, kalıp kavuğundaki boşluk oranı azalır ve akışa olan reçine direnci artar. Tablo 5 ve Şekil 12'deki sonuçlara göre, dolum anındaki giriş basıncı,

farklı elyaf hacim oranlarındaki benzetimlerde aynıdır. Bu sonuç, denklem (25)'de öngörüldüğü gibi olup ancak gerçekçi değildir.

RTM sürecinde elyaf hacim oranı, aynı tip örgülü/örgüsüz elyaf preformlar için, farklı sayıda elyaf katmanı kullanılarak değiştirilir. Ancak, katmanların kapalı kalıp içinde sıkıştırılma derecelerine bağlı olarak geçirgenlikleri de değişmektedir. Tablo 5 ve Şekil 12'deki sonuçlar için yapılan benzetimlerde, geçirgenlik değerinin bu değişimi ihmal edilmiştir. Elyaf hacim oranı arttıkça geçirgenlik değeri azalmalıdır.

Tablo 5. 1-boyutlu elyaf hacim oranı analizi için süreç parametreleri ve modelleme sonuçları

Giriş Basıncı, $u_0$ (mm/s)	1.0			
Geçirgenlik $K_{xx} \times 10^{-5}$ (mm <sup>2</sup> )	38.38			
Zaman adımı, $\Delta t$ (s)	0.1			
Reçine viskozitesi, $\mu$ (Pa.s)	0.5			
Elyaf hacim oranı, $v_f$ (%)	40	45	50	55
Dolum anındaki giriş basıncı (Pa)	3.89	3.89	3.89	3.88
Dolum zamanı (s)	18.00	16.00	15.00	13.50

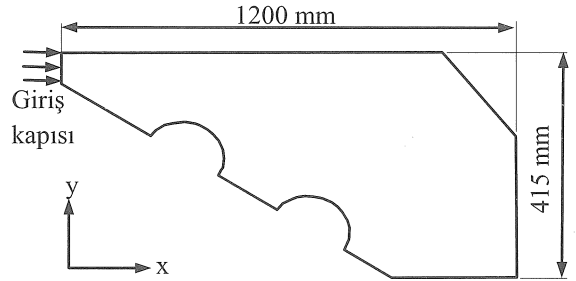


Şekil 12. 1-boyutlu Farklı elyaf hacim oranları için basınç değişimi

Geçirgenlik değerinin azalması da giriş basıncının daha da artmasına neden olacaktır (denklem (25)). Elyaf hacim oranının değişiminin akışa etkisini

parametrik olarak inceleyebilmek için geçirgenlik değerinin değişimi ihmal edilmemelidir.

**2 boyutlu karmaşık şekilli kalıp için RTM benzetimi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırma:** Geliştirilen programla, 2 boyutlu, karmaşık şekilli bir kalıp için RTM benzetimi yapılmış, sayısal sonuçlar, aynı kalıp için yazından alınan deneysel sonuçlarla [2] karşılaştırılmıştır. Şekil 13'te karmaşık şekilli kalıp, kalıbın boyutları ve enjeksiyon kapısı gösterilmiştir. Sayısal analiz için kullanılan süreç değişken değerleri, bu kalıp için gerçekleştirilen RTM deneylerinde [2] kullanılan değerlerdir ve Tablo 6'da verilmiştir. Kalıp kovuğunun kalınlığı, kalıbın diğer boyutlarından çok daha küçük olduğu için bu kalıp, 2-boyutlu RTM benzetimi için uygundur. Dolum eşyönsüz bir preform ( $K_{xx} \neq K_{yy}$ ) için gerçekleştirilmiştir. Bu sayede geliştirilen programın, eşyönsüz bir akış konfigürasyonundaki performansı da görülebilecektir.

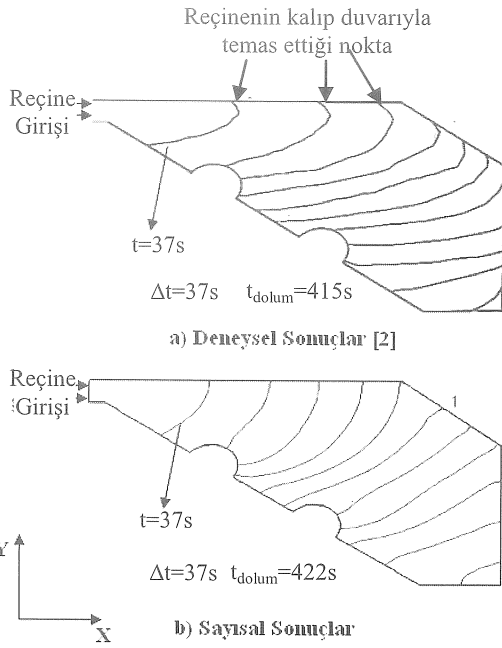


Şekil 13. 2-boyutlu, karmaşık şekilli kalıp kovuğu

Şekil 14'te, sayısal çözüm sonucu bulunan reçine akış cephesinin kalıp içindeki ilerleyişi, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar 37 saniyelik zaman adımlarında gösterilmiştir.

Tablo 6. Şekil 13'teki kalıp için gerçekleştirilen RTM benzetimi ve deneyinde kullanılan süreç parametre değerleri [2]

Reçine viskozitesi, $\mu$ , (Pa.s)	1.8
Geçirgenlik (mm <sup>2</sup> )	$K_{xx} = 28.7 \cdot 10^{-9}$
	$K_{yy} = 6.9 \cdot 10^{-9}$
Giriş hızı, $u_0$ , (mm/s)	56.6
Kalıp kalınlığı, (mm)	6.31



Şekil 14. 2-boyutlu reçine doluşunun deneysel ve sayısal modelleme sonuçları

Dolum aşamasının ilk yarısında akış cephesinin ilerlemesi kalıp kovuğu boyunca deneysel çalışmadaki ilerleme sonuçlarının bir miktar gerisinde kalmaktadır. Kalıbın ikinci yarısında, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki cephe ilerleme farkı kapanmıştır. Akış cephelerinin genel şekline bakılacak olursa, deneysel sonuçlarda reçinenin duvarla temas ettiği noktaların akış cephesinin diğer kısımlarından daha geride olduğu görülmektedir. Sayısal sonuçlarda, reçinenin duvarla temas ettiği noktalar cephenin diğer kısımlarından bu denli geride kalmamıştır. Sayısal modellemede kalıp duvarlarındaki sınır koşulu olarak kayma ("slip") koşulu uygulanmıştır. Deneysel sonuçlarda kaymama ("no-slip") koşulu akış cephesi şeklinden açıkça görülmektedir. Deneysel ve sayısal akış cephelerindeki şekilsel farklılığın, sınır koşullarının bu şekilde uygulanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sayısal çözümde bulunan akış cephelerinin izlediği yol ve dolum anında son geldiği nokta, deneysel sonuçlarla uyumludur. Kalıbın gerçek dolum süresi 415 saniye, sayısal çözüm ile elde edilen dolum süresi 422 saniyedir. Aradaki fark sadece 7 saniyedir. Kullanılan kalıbın şekil karmaşıklığı ve preformun eşyönsüzlüğü düşünüldüğünde, geliştirilen programın tatmin edici düzeyde, 2-boyutlu RTM benzetimi yapabildiği sonucuna varılmıştır.

## SONUÇ

Bu makalede, 2-boyutlu Darcy kanunu temel alınarak geliştirilen, RTM sürecinde kalıp içindeki reçine akışının matematiksel modeli ve sayısal çözüm yöntemi sunulmuştur. Geliştirilen model, karmaşık şekilli kalıp içine yerleştirilen elyaf preformun özelliklerine göre, eşyönlü veya eşyönsüz reçine akışını sanki-durağan (quasi-steady) ve izotermal olarak modelleyebilmektedir. Analitik çözümler ve yazından alınan deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalar, geliştirilen programın karmaşık şekilli ve eşyönsüz elyaf preformlar için tatmin edici doğrulukta kullanılabilirliğini öngörmüştür. Bu çalışmayı takiben, geliştirilen programla çeşitli RTM dolum senaryoları incelenecek; karmaşık şekilli kalıp içi akış benzetimleri, eşyönlü ve eşyönsüz elyaf preformlar ve tek/birden fazla kapılı enjeksiyon için yapılacaktır.

## MODELING OF RESIN IMPREGNATION IN RESIN TRANSFER MOLDING OF CONTINUOUS FIBER-REINFORCED COMPOSITES

In this study, a mathematical model based on Darcy's Law and its numerical implementation are presented to model the resin impregnation through the fibrous preform during resin transfer molding (RTM) of continuous-fiber reinforced composites. The developed model can simulate the isothermal flow of the resin through both isotropic and anisotropic preforms, for 2-D complex-shaped mold configurations. Using the model, important design information such as fill time, pressure distribution in the mold cavity and flow front progression are obtained. Parametric studies of process parameters are performed for 1-D resin impregnation and numerical results are compared with analytical solutions. Resin impregnation through a 2-D, complex shaped mold is simulated and the results are compared with an experimental case study from the literature. The developed model and numerical solver are observed to simulate resin impregnation through anisotropic preforms in complex-shaped molds, with acceptable accuracy.

**Keywords:** Resin Transfer Molding, Porous Flow Modeling, Numerical Analysis

## KAYNAKÇA

1. Shojaei, A., Numerical Simulation of Three-Dimensional Flow and Analysis of Filling Process in Compression Resin Transfer Molding, Composites. Part A, Applied science and manufacturing , 37 (2006), 1434–1450.
2. Coulter, J.P., Güçeri, S., Resin Transfer Molding and Research Opportunities, The Manufacturing Science of Composites. T.G. Gutowski, IV (1988), 79-86.
3. Simancek, P., Desirable Features in Mold Filling Simulations for Liquid Composite Molding Process, Polymer Composites, 25 (2004) 4.
4. İpek, H., Modeling of Resin Transfer Molding for Composite Manufacturing, Ms. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2005.
5. Friedrichs, B., Modeling of Three Dimensional Flow Fields in Injection and Resin Transfer Molding Processes, Ph.D. dissertation, Newark, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Delaware 19716, USA, 1992.
6. Yoo, Y., Lee W.I., Numerical Simulation of the Resin Transfer Mold Filling Process Using the Boundary Element Method, Polymer Composites, 17 (1996) 3.
7. Kang, M. K., Jung J. J., ve Lee W. I., Analysis of Resin Transfer Moulding Process with Controlled Multiple Gate Resin Injection, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31 (2000) 5, 407-422
8. Erdal, M., Güçeri, S., Danforth, S.C., Impregnation Molding of Particle Filled Pre ceramic Ploymers: Process Modeling, J American Ceramic Society, 82 (1999) 8, 2017-28.
9. Cheng, P., Tan, P.C., ve Springer, G.S., Composite Manufacturing: Simulation of 3-D resin Transfer Molding, SAGE, Journal of Compoiste Materials, 33 (1988), 1716
10. Erdal, M., Impregnation Molding of Continuous Fiber-Reinforced Ceramic-Ceramic Composites Using Pre ceramic Polymers, PhD. Thesis, University of Illinois at Chicago, USA, 1998.
11. Cai, Z., Analysis of Mold Filling in RTM processes, Journal of Composite Materials, 26 (1992) 9, 1310-1338.

# FDM (Fused Deposition Modeling) Yöntemi ile Çalışan Hızlı Prototip Cihazlarında Kullanılan ABS Flament Telin Üretilmesi

Bülent Ekici  
Doç. Dr.

Hüseyin Yaltrık  
Mak. Yük. Müh.

Marmara Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü

*Tübitak'ın desteklediği bu çalışmada FDM yöntemi ile prototip üretebilen bir makine tasarlanıp üretilmiştir. Bu makine bilgisayar kontrollü olup, alışlagelmiş üç eksenli kartezyen sistemine teli süren dördüncü eksen ,C eksenini , ilave edilerek kullanılmıştır. Prototip makinede sistemin başarıyla çalışması, alt sistemlerin doğru olarak üretilmesine bağlıdır. Bu üretim içinde var olan mevcut yapılar incelenir ve uygun olanlar tercih edilir. Bu alt sistemleri kartezyen robot, ekstrüder kafa, telin imal edilmesi, taban köpüğü ve yazılım olarak sıralayabiliriz. Bunlardan bazıları bilinen yöntemlerdir. Örneğin kartezyen robot uygulamaları yaygındır. Bazıları ise prototip makineye özgün sistemlerdir. Örneğin ekstrüder kafa ve telin imal edilme yöntemleri sadece bu sisteme yöneliktir ve kritik unsurlar olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ABS malzemeden üretilen telin değişik kombinasyonlarda gösterdiği değişik davranışlar incelenmiştir. Sürekli akışı sağlayabilecek bir kombinasyon elde edilmeye çalışılmıştır.*

*Anahtar kelime: Kartezyen robot ,ekstrüder kafa, ABS flament tel*

## GİRİŞ

Plastik ve metal kalıpcılığında kalıp öncesi ürün doğrulatma ihtiyacından dolayı model yapma günümüzde yaygın olarak kullanılan bilinen eski bir yöntemdir. Bu amaçla uzun yıllar model malzemesi olarak ahşap kullanılmış. Daha sonra ahşabın yerini araldid almıştır. Model yapımında el becerisinin egemen olduğu bu yıllarda aynı modelin yeniden inşası neredeyse imkânsızdı. [1] Modellerin el becerisi ile yapılması bu işlemin uzun sürmesini de beraberinde getirmekteydi [2]. Günümüzde ürün oluşturma süreçlerindeki kısılma ihtiyacı bu tip model yapma yöntemlerini geçersiz kılmıştır.

Ürün geliştirme süreçlerinin ilk adımını prototip (model) oluşturmaktadır. Silikon kalıplama yöntemi ile oluşturulan prototip daha sonra promosyon amacıyla üretilecek kalıplarda 100 adete kadar kullanılmaktadır. Kullanılan malzemeler çift bileşenli sıvı polimerlerdir. Üretilen prototipin yüzey kalitesi silikon kalıbın başarısını etkilemektedir. Bu nedenle değişik prototip üretme yöntemlerinin varlığını bilerek [3] silikon kalıplama aşamasının da dahil edileceği bir ürün geliştirme sürecinde [4], prototip üretme yöntemini doğru seçmek gerekir [5]. Mevcut prototip üretme yöntemleri, FDM,

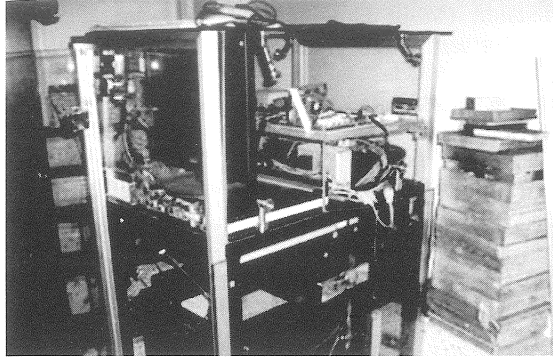
Stereolitography, SLS (Selective Laser Sintering) ve OBJET teknolojileridir[6] . Bunlara ek başka yöntemler de vardır [7]. Ama bunların hepsi silikon kalıplama yöntemi ile tam uyumlu değildir.

Bu çalışmada ürün geliştirme sürecine uygun bir yöntem olan FDM yöntemiyle çalışan , bilgisayar kontrollü bir makine üzerinde kullanılacak ABS flament telin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla mevcut olan ticari teller üzerinde gerekli test ve analizler yapılmış, bu analizlerden elde edilen sonuçlar vasıtasıyla çok sayıda tel üretim denemesi gerçekleştirilmiştir. Üretilen teller TÜBİTAK tarafından desteklenen makinede denenmiş ve sonuçları tatmin edici bulunmuştur.

## GEREÇ VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada üretilen tellerin çapları 1.8mm olup ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Gerek malzeme bileşenleri gerekse üretim parametreleri teli etkilemektedir. Özellikle çevre şartları (nem) telin akışının başarısını belirlemektedir. Çok sayıda etkenin mevcut olması üretilen tellerin denemelere tabi tutulmasını gerekli kılmıştır. Bu amaçla Şekil 1'de verilen prototip makinesi kullanılmıştır





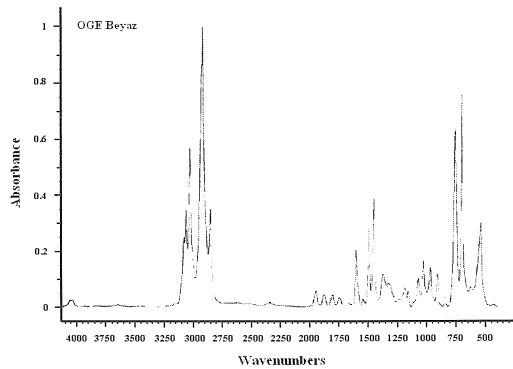
Şekil 1. Deneylerin yapıldığı prototip makinesi

### ABS TEL ÜRETİMİ İÇİN YAPILAN TEST VE ANALİZLER

Testler malzemeler için Arçelik polimer grubunda kimyasal, Sabancı Üniveristesinde SEM ile mikro yapı ve Marmara Üniversitesi Malzeme Müh. Bölümünde çekme deneyleri ile gerçekleştirilmiştir.

İthal edilen orijinal malzemenin evsafının belirlenmesi için polimer grubunda çeşitli test ve analizler yapılmıştır. Testlerde model ve destek malzemelerinin içerikleri belirlenmiştir. FT-IR testi sonucunda elde edilen wavenumber grafiğinin şekli kütüphanesinde bulunan her malzemenin grafik şekliyle program tarafından karşılaştırma yapılır. Bu yöntemde kullanılan malzemelerin standart ekstrüzyon ABS malzeme olduğu anlaşılmıştır.

Destek malzemesi içinde nitril olduğu bunun da kırılgenliği sağladığı belirlenmiştir. Test yapılan model malzemesinin sonucu Şekil 2 ve Tablo 1'de destek malzemesinin sonucu Şekil 3 ve Tablo 2'de verilmiştir. Test sonuçları veri tabanındaki nitrilli ve nitrilsiz standart ABS'lerle uyum göstermiştir.



Şekil 2. Model Malzemesinin FT-IR Testi ile Malzeme Tayininin Yapılması

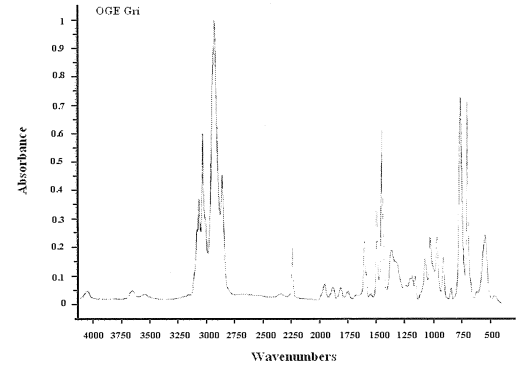
Polimer grubunun önerdiği ABS, grade 5 ekstrüzyon tipi ABS olmuştur. Daha detaylı analiz için malzeme karakterizasyon laboratuvarında çalışılmış ve yapılan çalışmanın sonuçlarında

**MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ**

malzemenin gerçek kompozisyonu elde edilmiştir. Çekilen SEM mikro yapı fotoğraflarında plastik malzemedeki önemli sayılabilecek boşluklar olduğu görülmektedir (Şekil 4). Bu boşlukların ekstrüzyon işlemi sırasında eklenen köpürtme katkısı ile sağlandığı ve yapılan analiz sonucunda ABS malzeme içindeki 55% Acrylic, 35% Butadiene ve 10% Styrene kompozisyonu belirlenmiştir.

Tablo 1 Test Edilen Model Malzemesi Bilgileri

İsim	Değer
Başlık	Stereon 880a
Teknik	Film (cast from chloroform)
Açıklama	Kimyasal tanım = butadiene-styrene, Copolymer
Sertlik	(Shore d) 75
Örnek Kaynağı	Frestonesyntretic rubber and latex Company

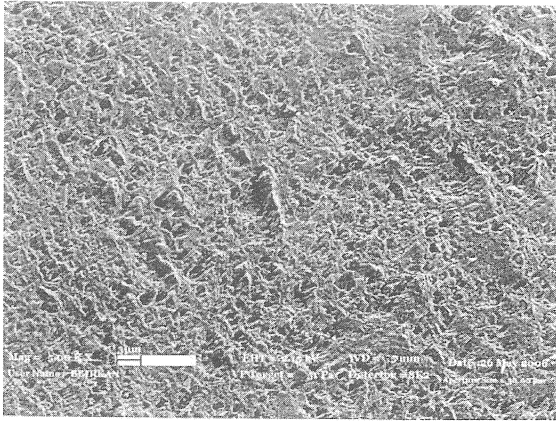


Şekil 3. Destek Malzemesinin FT-IR Testi ile Malzeme Tayininin Yapılması

Tablo 2. Test Edilen Destek Malzemesi Bilgileri

İsim	Değer
Başlık	Abson89110acrylonitline/butadiene/styrene, Bileşik
Teknik	Film
Sınıflama	Polymers=acrylonitline-butadiene- styrene resins
Örnek Kaynağı	Goodrich, b.f. , Kimya Şirketi

Bu bilgiler ışığında benzer bir hammadde elde etmek için orijinal malzemenin tespit edilen kompozisyonuna yakın ürün satın alınmıştır. Temin edilen malzeme firma tarafından verilen bilgilere göre köpürme ajanı katkı malzemesi eklenerek ekstrüzyon edilmiş, ancak katkı malzemesi fazla konulduğundan köpürme oluşmuştur. Bunun üzerine katkı malzemesi belirtilenin ¼ oranında eklenip ikinci kez tel çekilmiştir. Çekimde elde edilen tel çapları başarılı olmuştur.



Şekil 4. Model Malzemenin Mikro Yapısı

Acrylonitrile-butadiene-styrene	200/5.0
	230/3.8
	220/10

### ABS TELİN ÜRETİMİ İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR

ABS telin üretilmesi için değişik zamanlarda değişik kurumlar ile çalışmalar yapılmıştır. Orijinal ürün üzerinde yapılan testler ve kompozisyon tayininden sonra sırasıyla Resinex, Dow ve Bayer kimya firmalarından gönderilen malzemeler kullanılarak tel üretimleri yapılmıştır (Tablo 3). Bu amaçla değişik ekstrüzyon kalıpları yapılmıştır. Bu malzemelerle yapılan pek çok ekstrüzyon çekme işleminde bazı sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu sorunlardan en önemlileri çekilen telin kesitinin daireselliği ve tel çapının sürekliliğinin korunamamasıdır. İlk üç çekimde bunlar başarısız olmuştur. Fakat daha sonra yapılan çekimlerin bir bölümünde dairesellik elde edilmiş olmasına rağmen tel çapının istenen düzeyde olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sorunların aşılması için denemelere devam edilmektedir.

Tablo 3. Dene Numune kompozisyonları ve Üreticileri

Numune	Kompozisyon	Üretici
1	40% acrylic, 35% butadiene ve 25% styrene	Resinex
2	50% acrylic, 40% butadiene ve 10% styrene	Dow
3	55% acrylic, 35% butadiene ve 10% styrene	Orijinal Model
4	55% acrylic, 30% butadiene ve 15% styrene	Bayer Kimya
5	50% acrylic, 35% butadiene ve 15% styrene	Bayer Kimya

### TEST VE DENEYLER

ABS filament teller üzerindeki çalışmalarda aşağıdaki test ve deneyler yapılmıştır. İlk deney akış

endeksidir (Mold Flow Index). Daha sonra çekme deneyi ve sertlik deneyleri yapılmıştır.

### AKIŞ ENDEKSİ DENEYİ

Hızlı prototip işleminde polimerin eritilmesi en önemli olaydır. Kalıp akış oranı; termoplastiğin bir enjektörden belirli bir sıcaklık ve yükte hangi oranda ekstrüzyon edileceğini belirlemektedir. Akış endeksi plastikleri sınıflandırma olanağını bu şekilde sağlamaktadır.

Akış endeksleri sütunundaki değerlerin ilki malzemenin tabii tutulduğu sıcaklığı, ikincisi de basma kuvveti için gerekli olan kütle değerini göstermektedir. Birimler de sıcaklık için santigrad derece, kütle için de kg'dır

ABS malzeme için değişik akış endeksleri test yöntemleri vardır. Bunlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. ABS için Standart Akış Endeksleri

Bu akış endeksi testleri ASTM D1238 standardına uygun şekilde 5 kg ve 200 °C de yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

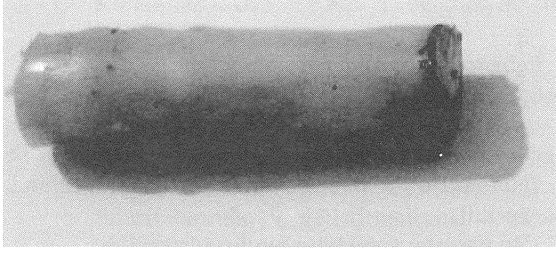
Deneyler aşağıda açıklandığı üzere yapılmıştır,

1. Her bir numuneden 11 adet 3 mm boyunda ve 2 mm çapında örnekler kesilmiştir,
2. Bu numunelere daha sonra test cihazına konulmuş ve 10 dakika beklenmiştir
3. Cihaza konulan 5 kg ağırlık yardımı ile eriyen plastik alt taraftaki bölümden akmaya başlamıştır,
4. Her 10 dakikada eriyen plastik alınmıştır,
5. Alınan erimiş plastikler hassas tartılarda tartılmıştır.

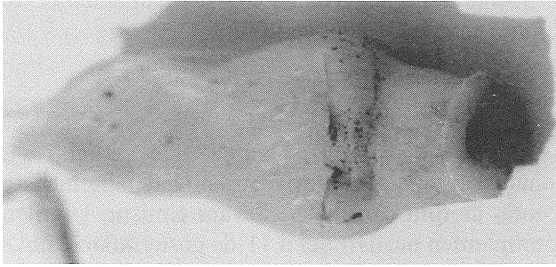
Tablo 5. Akış Endeksi Sonuçları

Gr/10 dak	Numuneler				
	1	2	3	4	5
Ortalama Akış Endeksi	0.769 g	1.431 g	1.610 g	3.120 g	1.222 g
	0.942 g	1.433 g	1.630 g	3.320 g	1.248 g
	0.861 g	1.417 g	1.578 g	3.355 g	1.253 g
	0.811 g	1.380 g	1.530 g	3.365 g	1.273 g
	0.784 g	1.370 g	1.516 g	3.475 g	1.245 g
	0.750 g	1.375 g	1.525 g	3.600 g	1.259 g
	0.720 g	1.379 g	1.560 g	3.505 g	1.243 g
	0.700 g	1.335 g	1.510 g	3.452 g	1.257 g
	0.689 g	1.350 g	1.530 g	3.336 g	1.272 g
	0.710 g	1.332 g	1.520 g	3.290 g	1.243 g
0.730 g	1.325 g	1.526 g	3.315 g	1.248 g	

Bu testlerden elde edilen sonuçlarla malzemelerin akma değerleri elde edilmiştir. Bu malzemelerden üretilen tellerle FDM cihazı ile uygulamalar yapılmıştır. Ancak 5,6 ve 7 numaralı şekillerde görüldüğü üzere uygulamalardan elde edilen sonuçlar akış endeksi sonucundan farklı çıkmıştır.

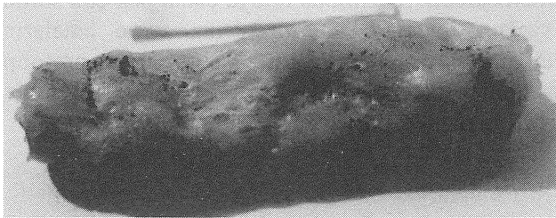


Şekil 5. Numune 1



Şekil 6. Numune 3

Diğer taraftan numunelerin erimesi çıplak gözle de takip edilmiştir. 1 ve 3 numaralı numunelerin erimesi çok iyi ve homojendir. Halbuki 5 numaralı numune çok zor erimiştir. Numunede bazı oyuklar oluşmuştur, bunlar Şekil 7 'de görülmektedir.



Şekil 7. 5 Numaralı Numunenin Erime Şekli

#### ÇEKME DENEYİ

Çekme deneyleri Tablo 3'te belirtilen malzemeler üzerinde yapılmıştır.

Bir malzemenin çekme kuvveti altında kopmaya gösterdiği direnç kabiliyeti yapısal elemanların en çok ölçülen ve en önemli özelliğidir. Bir malzemeyi koparmak için gereken kuvvet/alan (MPa veya PSI) bir şekilde maksimum çekme mukavemeti olarak tanımlanır. Çekme deneyinin uygulama hız oranı 5.08 den 508 mm/dakika aralığında değişmektedir. Bu hız oranları çekme

deneyinin sonuçlarını etkiler. Çekme deneyinin yapılması için oluşturulan test metotları ISO 527 ve ASTM D638 de belirtilmiştir. Bu standartlarda yapılan deney sonuçları birbirlerine yakındır ve iyi sonuçlar vermektedir. Polimerler için özel test standartları uygulanmaktadır. Bunlar polimerler için ASTM D882 ve elastomerler için ASTM D412 dir

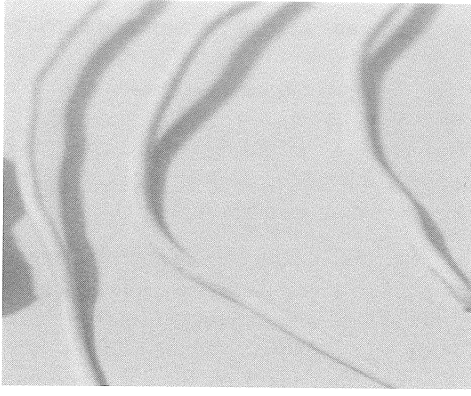
Maksimum uzama; bir numunenin çekme deneyinde kopma anındaki boyunun, ilk boyuna olan yüzdesi olarak tanımlanır. Elastomerlerde, film/paketleme poliolefinlerde bu oran birkaç katıdır (200%). Katı plastikler özellikle fiber takviyeli olanlar bu oranın 5% den daha azdır. Yüksek maksimum Çekme Mukavemeti ve Maksimum Çekme uzamasının birlikte aynı malzemede olması tokluğun yüksek olması anlamındadır.

Tablo 6. ABS Tel Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçları

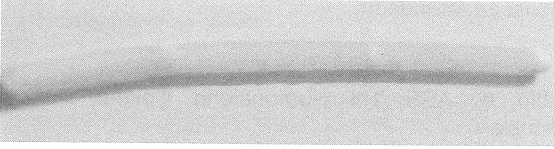
Numune	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Mukavemet MPa	Uzama %
1	156,25	49,750	100
2	152,25	48,725	6
3	158.00	50,275	70,8
4	161,75	51.250	34
5	154 00	49 000	9

ABS telin çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu telin çapının 1.78 mm ve kesitinin dairesel olması başarılıdır. Tel haline getirilen numunelerde çekme testi yapılmıştır (Tablo 6).

Sonuç olarak 2 numaralı numunenin uygun olmadığı deney sonuçlarından da görülmektedir. Buna rağmen ekstrüder kafadan akıtılarak denemeleri yapılmıştır. Bu numunede çok sorun yaşanmıştır. Bunun nedeni de kafadaki motorları bir şekilde durdurup tekrar çalıştırdığımızda malzeme akışında kesintilerin oluşmasıdır. 3 numaralı malzemenin çekme testinde deformasyonun kusursuz olduğu görülmüştür. Şekil 8'de görüldüğü üzere deformasyon tüm numuneye yayılmıştır. Diğer numunelerde (Şekil 9) ise deformasyonun lokalde kaldığı ve yayılmadığı tespit edilmiştir. Lokal deformasyonun fazla olduğu bölgelerde kopma gerçekleşmektedir. Maksimum çekme mukavemeti neredeyse hepsinde aynıdır 1 ve 3 numaralı numunelerde oldukça iyi uzamalar elde edilmiştir. Fakat 2, 4 ve 5 numaralı numunelerin uzama yönünden bunlarla örtüşmediği gözlenmiştir. Mekanik açıdan uzamaların referans alınması gerekmektedir.



Şekil 8. 3 Numaralı Numunenin Çekme Deneyi



Şekil 9. 5 Numaralı Numune

### SERTLİK TESTİ

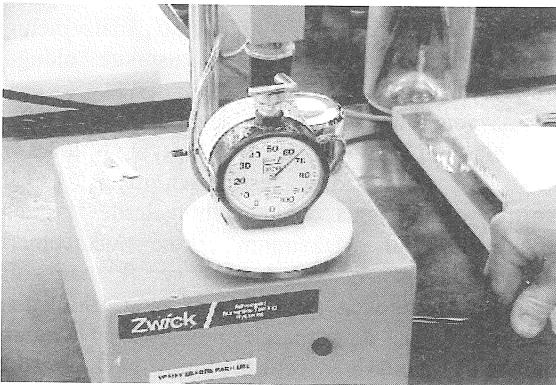
Bütün numune boyları 1 cm olarak hazırlanmıştır. Daha sonra laboratuardaki bir fırına yerleştirilmiş ve 285°C (erime sıcaklığı) kadar ısıtılmıştır. Erginen- plastikler kullanılarak test numuneleri hazırlanmıştır.

Sertlik ölçme metodu, konik bir ucun malzemeye girerken malzemenin gösterdiği direnç olarak adlandırılır.

Sertlik değeri 0 (tam giriş) dan 100 (giriş yok) kadar sınıflandırılır. Tam giriş derinliği kullanılan ekipmanlara bağlı olarak 2.46 ve 2.54 mm olarak belirlenmiştir.

Deneysel hazırlanma:

Zwick Shore test cihazını (Şekil 10) kullanarak ASTM D2240 standartına uygun şekilde sertlik deneyleri gerçekleştirildi.



Şekil 10. Sertlik Test Cihazı

### Deney prosedürü;

Tablo 7 Sertlik Değerleri

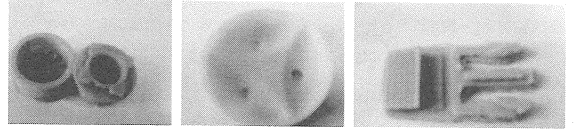
Numune	Sertlik Değeri (Shore)
1	26
2	27
3	24
4	24
5	27
6	28

1. Numuneler 3 mm boyunda ve 2 mm çapında kesildi,
2. Bu parçalar kaba koyulup fırında eritildi,
3. Eriyen plastik kullanılarak sertlik numuneleri hazırlandı,
4. Her bir numuneden 15 kg yük kullanılarak 10 ayrı sertlik ölçümü yapıldı ,

Deney sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

### PROTOTİP BULGULARI

Montajların tamamlanması ve reel testler ile birlikte prototip üretimi çalışmaları devam etmiştir. Üretilen prototiplerden bazıları Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Üretilmeye Çalışılan Ürün Örnekleri

Prototip üretimini geliştirilen yazılımın başarısı etkilemektedir. Yazılımda ortaya çıkan pek çok sorun dosyaların teker teker düzenlenmesi ve hataların ayıklanması ile giderilmiştir. Yazılımın ve prototip cihazının profesyonelleştirilmesi için bundan sonra da çalışmalar yapılacaktır.

### SONUÇ

Özellikle kesit taramasında geliştirilen algoritmalar bu projeye özgündür. Bu konuda yapılan çalışmaların harcanan malzeme miktarını azaltma etkisi vardır. O nedenle büyük parçaların yapımında hemen zamandan hem de malzemedan kazanmak için kesit içi tarama algoritması önem kazanacaktır. Bu çalışmada üretilmesi önerilen prototip makine yapılmıştır. Bu üretimde var olan teknolojinin unsurlarının incelenmesi amacıyla çeşitli satın almalar yapılmış ve ekipmanların çalışma prensipleri incelendikten sonra alt sistemlerin geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Ekstrüzyon çekme deneylerinde çekilen telin kesitinin daireselliği elde edilmiş fakat tel

- çapının sürekliliğinin korunması istenilen düzeyde olmadığı belirlenmiştir. Bu daireselliği sağlamak için makineye hidrolik bir makine monte edilmelidir,
2. Çekilen SEM mikro yapı fotoğraflarında plastik malzemede gözenekler olduğu görülmüştür,
  3. Kullanılan ABS, grade 5 ekstrüzyon tipi ABS olmuştur,
  4. 6 adet numunenin her birine numuneden 15 kg yük kullanılarak 10 ayrı sertlik ölçümü yapılmıştır,
  5. ABS dışındaki plastik malzemelerin kullanılabilmesi için ekstrüder kafa tasarımlarında geliştirmelerin olması gerektiği tespit edilmiştir,
  6. Makinede kullanılacak ABS hammadde telin üretimi farklı kombinasyonlarda yapılmıştır. Değişik ABS malzemelerin akışlarının prototip üretimine uygun olduğu görülmüştür,

#### TEŞEKKÜR

Bu bilgileri elde etmemizi sağlayan TÜBİTAK'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz

#### KAYNAKÇA

1. Hopkinson N., Hague R., Dickens P., "Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age", Wiley; 2005, Pp:126,

2. Kolarevic B., "Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing". Taylor & Francis, 2005. Pp:56,
3. Jacobs P.F., "Stereolithography and Other RP and M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling", Society of Manufacturing Engineers, ASME Press, 1995. Pp:232,
4. Cooper K.G., "Rapid Prototyping Technology; Selection and Application", Taylor & Francis, 2007. Pp:144,
5. Venuvinod P.K., Ma W., "Rapid Prototyping - Laser-based and Other Technologies"; Kluwer Academic Publishers, 2003. Pp: 78,
6. Varadan V., Jiang X., "Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS". Wiley, 2001. Pp:65 ,
7. Upcraft S., Ranky P.G., "Rapid Prototyping Solutions"; pub. by CIMware USA Inc., 2003. Pp:95,
8. Wood L., "Rapid Automated Prototyping: An Introduction", Industrial Press, 1993. Pp:71.

Süleyman Kılıç

Kilis 7 Aralık Üniversitesi  
Meslek Yüksekokulu Makine  
Bölümü 79000 KİLİS

**Fahrettin Öztürk,**  
Niğde Üniversitesi Mühendislik-  
Mimarlık Fakültesi Makine  
Müh. 51245 NİĞDE

**Serkan Toros**  
Niğde Üniversitesi Mühendislik-  
Mimarlık Fakültesi Makine  
Müh. 51245 NİĞDE

# DP800 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin ve Geri Esneme Davranışının İncelenmesi

*Bu çalışmada son yıllarda otomotiv endüstrisindeki kullanımında artış görülen yüksek mukavemetli DP 800 sac malzemelerin mekanik özelliklerinin deformasyon hızına bağlı değişimi ve geri esneme davranışları incelenmiştir. Aynı zamanda malzemenin şekillendirme işleminin ETA-Dynaform 5.5 sonlu elemanlar yazılımında simülasyonları yapılmış, malzeme elde edilen geri esneme miktarları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Malzemenin geri esneme davranışının, artan deformasyon hızına bağlı olarak çok az miktarda azaldığı ve sac genişliğinin geri esneme üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları ile deneysel veriler arasında farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.*

*Anahtar kelimeler: DP çelikler, DP800, İki fazlı çelikler, Eğme, Geri esneme, Sonlu elemanlar analizi*

## GİRİŞ

Son yıllarda yakıt tasarrufu sağlamak ve CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmak amacıyla otomobillerin ağırlıklarının azaltılması yönündeki çalışmalara hız verilmiştir. Bu çalışmaların başında da yüksek mukavemetli çelikler gibi mukavemet-ağırlık oranı yüksek olan malzemelerin kullanımının artırılması yönündeki çalışmalar yer almaktadır [1-3]. Bu oranın yüksek olması taşıtlarda istenen mukavemet özelliklerinin daha ince malzemelerden üretilmiş parçalardan elde edilebilmesine imkan sağlamaktadır. Çift fazlı çelikler (Dual Phase) yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerin A1 ve A3 kritik sıcaklıkları arasında (ferrit + östenit) tavlınması ve bu sıcaklıklar arasında bir süre tutulmasının ardından hedef yapıyı elde edebilecek soğuma hızında soğutulması ile elde edilmektedirler. Çift fazlı çeliklerin mikroyapıları, ferrit matrisi içerisinde dağılmış yaklaşık %20 sert martenzit fazından oluşmaktadır [4]. Bu yapı da malzemenin üstün mukavemet özelliklerine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasının sağlanması ise malzemenin kolay şekillendirilebilirliği ile mümkün olmaktadır. Bu malzemeler oda sıcaklığında şekillendirilmesine rağmen şekillendirme sonrası büyük miktarda geri esneme göstermektedirler. Ortaya çıkan geri esneme iş parçalarındaki boyutsal tamlığın bozulmasına ve montaj esnasında sıkıntılara yol açmaktadır. Malzemelerde gözlemlenen geri esneme davranışlarının tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması büyük önem arz etmektedir. Literatürde malzemelerin bu özelliklerinin

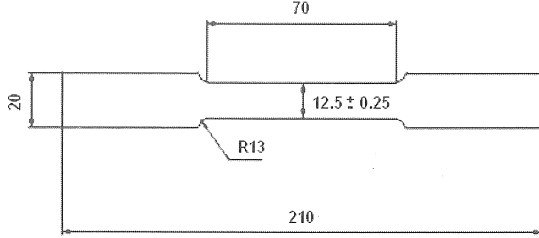
incelenmesi konusunda birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalarda yoğun olarak malzemelerin mekanik özelliklerinin (elastiklik modülü, akma kabiliyeti, kalınlık, pekleşme özelliği vs.) ve işlem parametrelerinin (kalıp geometrileri, bükme açısı, uygulanan yük vs.) etkilerinin çalışıldığı görülmektedir [5-12]. Deneysel çalışmalara ilave olarak sonlu elemanlar programları kullanılarak analizler yapılmaktadır. Bilgisayar ortamında yapılan simülasyon çalışmaları maliyet ve zaman açısından imalatçıya büyük avantajlar sağlamak ve üretim esnasında ortaya çıkacak bir çok problem önceden çözüme kavuşturulabilmektedir. Bu durumda simülasyonların doğruluğu çok büyük önem arz etmektedir. Simülasyonların doğruluğuna etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin en önemlilerinden birisi kullanılan malzeme modelleridir. Literatürde bu konu ile ilgili bir çok çalışma bulunmaktadır. Simülasyon sonuçlarının uygulamada daha etkili kullanılması amacıyla farklı kodlar ve yaklaşımlar açıklanmış ve yeni teorilerin de oluşturulmasına hız verilmiştir [13-18].

Yapılan bu çalışmada DP800 çeliğinin öncelikle farklı hızlarda mekanik özellikleri incelenmiş daha sonra geri esneme davranışının belirlenmesi amacı ile V-kalıpta eğme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca eğme deneyi ETA-Dynaform sonlu elemanlar analiz programında modellenip farklı malzeme modelleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



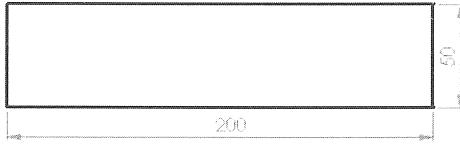
## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

İlk olarak 0,8 mm kalınlığındaki DP800 sac malzemeden ASTM-E8 standardına uygun çekme deney numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 1). Numuneler su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Daha sonra da oda sıcaklığında Shimadzu Autograph 100kN çekme cihazında 5-500 mm/dk çene hızı aralığında çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Birim deformasyon ölçümleri video tip extensometre ile yapılmıştır.

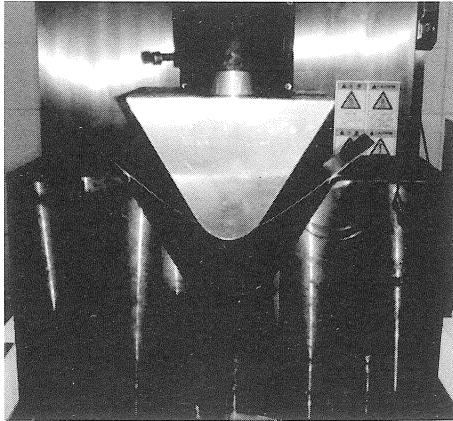


Şekil 1 Çekme deney numunesi ölçüleri

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde ise Şekil 2'deki gibi eğme deney numuneleri hazırlanmıştır. Parça geometrisinin etkisini de incelemek amacıyla numuneler farklı genişliklerde (25, 50, 75, ve 100 mm) hazırlanmıştır. Eğme işlemi Resim 1'de görülen 60° açılı V kalıpla 25 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Geri esneme açıları  $\pm 5$  dk hassasiyetindeki Mitutoyo 187-907 üniversal açıölçer ile yapılmıştır.



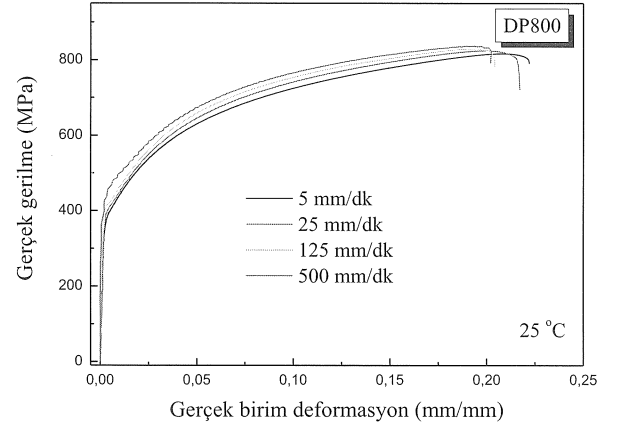
Şekil 2 Eğme deney numunesi



Resim 1 60° açılı V kalıp deney düzeneği

## ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI

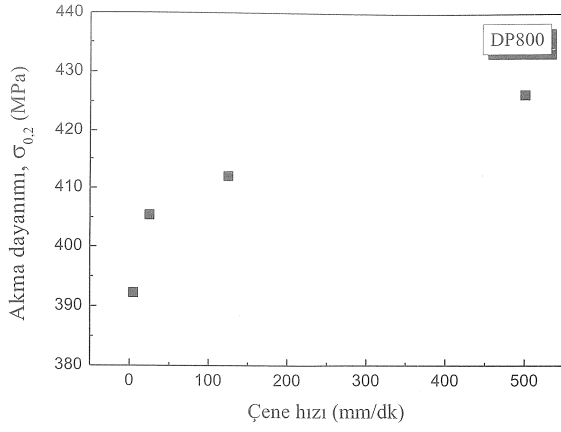
Çekme deneyleri 5, 25, 125 ve 500 mm/dk çene hızlarında gerçekleştirilmiş olup malzemenin hızla bağlı olarak mekanik özelliklerinin değişimi belirlenmiştir. Her bir deney üçer kez tekrar edilerek ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Eğme deneyleri ise 5, 25, 125, 500 ve 1000 mm/dk zımba hızlarında gerçekleştirilmiştir. Video ekstensometre ile 1000 mm/dk hızında veri alamadığımız için çekme deneyleri bu çene hızında yapılmamıştır. Şekil 3'te malzemenin gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri dört farklı hız değeri için gösterilmiştir. Şekilde malzemenin mukavemetinin artan hızla birlikte çok az miktarda arttığı tespit edilmiştir. Toplam birim deformasyonda da aynı şekilde çok az bir miktarda düşüş görülmüştür. 125 mm/dk ve 500 mm/dk çene hızları arasında ise neredeyse fark yoktur. Deneysel veriler değerlendirilerek malzemenin hızla bağlı akma ve çekme dayanımının değişimi tespit edilmiştir. Deneysel veriler işlenerek malzemenin pekleşme katsayısı (n), mukavemet katsayısı (K) ve deformasyon oranı hassasiyeti (m) de hesaplanmıştır. Akma noktasının tespitinde birim deformasyonunun % 0,2'si kullanılmıştır.



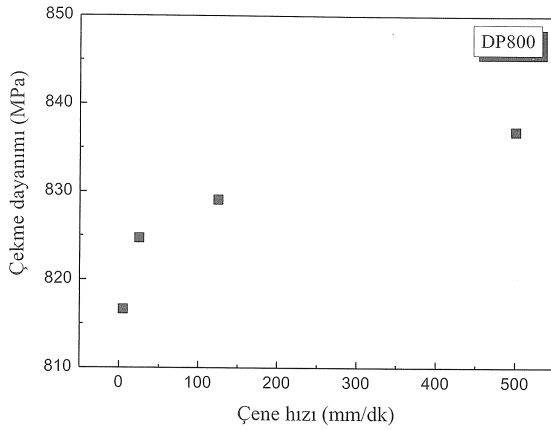
Şekil 3 Gerçek Gerilme Birim deformasyon eğrisi

Şekil 4'te malzemeye ait akma dayanımın deformasyon hızına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere malzemeye ait akma eğrileri şekillendirme hızının artması ile artmaktadır. Rakamsal olarak 392 MPa'dan 426 MPa'a arttığı görülmüştür.



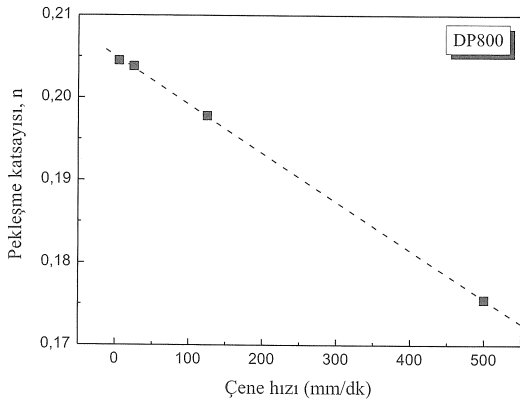


Şekil 4 Akma dayanımının çene hızı ile değişimi



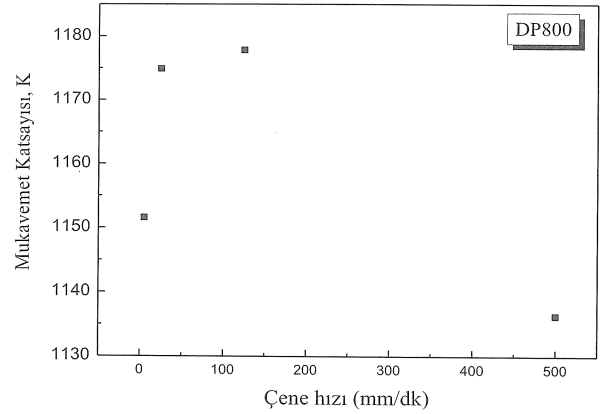
Şekil 5 Çekme dayanımının çene hızı ile değişimi

Malzemenin çekme dayanımındaki değişimi Şekil 5'te verilmiştir. 25 mm/dk çene hızında 816 MPa iken, 500 mm/dk çene hızında 836 MPa'a artmıştır. Malzemenin akma dayanımındaki artış miktarının çekme dayanımına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu ise malzemenin pekleşme hızının birim deformasyonla birlikte azaldığını göstermektedir. Malzemeye ait pekleşme katsayısının değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



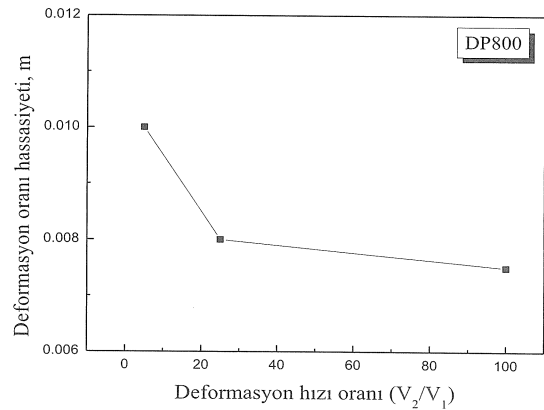
Şekil 6 Pекleşme katsayısının çene hızı ile değişimi

Grafikten malzemenin pekleşme kabiliyetinin, uygulanan deformasyon hızı ile birlikte azaldığı gözlemlenmiş olup rakamsal olarak 0,20'den 0,17'ye düşmüştür. Şekil 7'de ise malzemeye ait mukavemet katsayısındaki değişim gösterilmiştir. Şekilden malzemenin mukavemet katsayısı değerinde bir dalgalanma olduğu gözlemlenmiş olup 125 mm/dk çene hızına kadar arttığı ve bu hızdan sonra da azaldığı görülmektedir. Malzemelerin şekillendirilmesinde önemli bir rol oynayan diğer bir mekanik özellik ise malzemenin deformasyon oranı hassasiyetidir. Çeliklerde bu özellik belirli bir şekillendirme hızına kadar duyarsız davranmaktadır. Şekil 8 ve 9'da malzemenin hız duyarlılığının sırasıyla şekillendirme hızı oranı ile birim deformasyon boyunca değişimi verilmektedir.

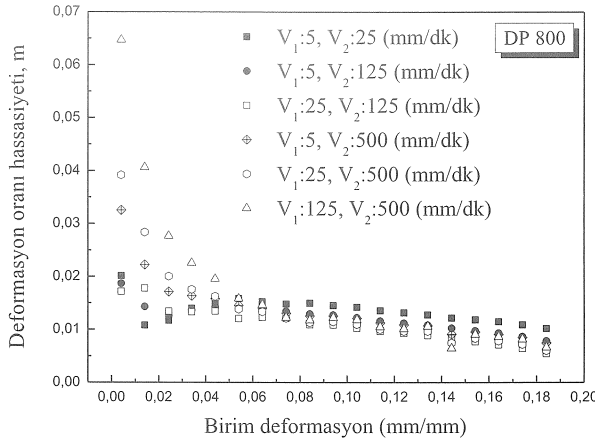


Şekil 7 Mukavemet katsayısının çene hızı ile değişimi

$V_1$  sabit hızı 5,  $V_2$  hızları ise 25, 125 ve 500 mm/dk çene hızı olarak, Şekil 8'deki deformasyon oranı hassasiyetinin değişim grafiği verilmiştir. Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi deformasyon hızı oranı ve birim deformasyon arttıkça malzemenin deformasyon oranı hassasiyeti azalmaktadır.



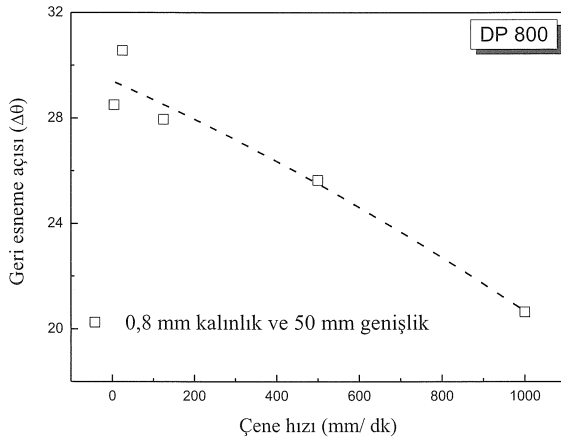
Şekil 8 Deformasyon oranı hassasiyetinin deformasyon hızı oranı ile değişimi



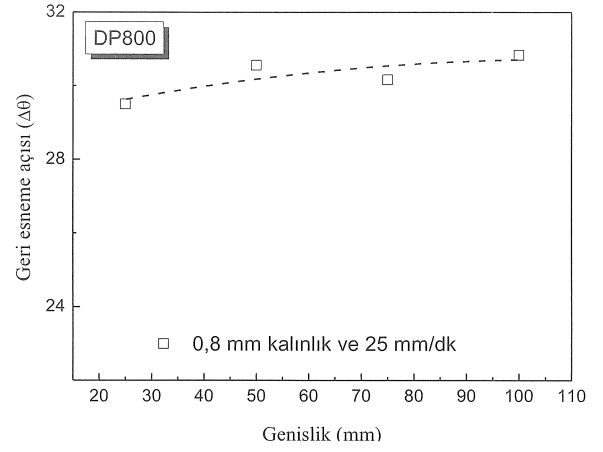
Şekil 9 Deformasyon oranı hassasiyetinin birim deformasyon ile değişimi

### EĞME DENEYİ SONUÇLARI

Malzemenin geri esneme davranışları  $60^\circ$  lik V kalıpta 20 mm' lik burun yarıçapına sahip zımba kullanılarak belirlenmiştir. İlk olarak 0,8 mm kalınlığında ve 50 mm genişliğindeki numuneler farklı hızlarda şekillendirilmiştir. Daha sonra da farklı genişlikteki numuneler sabit 25 mm/dk deformasyon hızında şekillendirilerek şekillendirme hızının ve parça genişliğinin geri esneme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 10 ve 11 sırasıyla, malzemenin geri esneme miktarının, şekillendirme hızına ve malzeme genişliğine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Deformasyon hızının artmasıyla beraber geri esneme değerinin  $9^\circ$  kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bununla birlikte malzemenin genişliğinin artmasıyla da geri esneme miktarının  $1,3^\circ$  kadar arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak malzeme genişliğinin geri esneme üzerinde önemli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir.



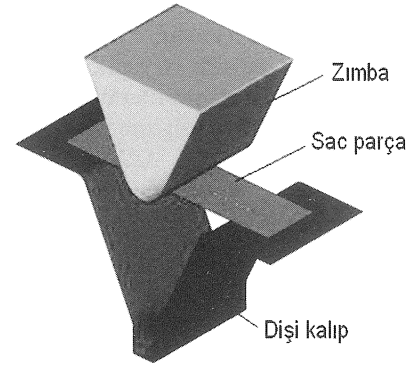
Şekil 10 Geri esneme miktarının zımba hızı ile değişimi



Şekil 11 Geri esneme miktarının genişlik ile değişimi

### SONLU ELAMANLAR SİMÜLASYONLARI

Bu çalışmada DP800 yüksek mukavemetli çeliğinin şekillendirme ve geri esneme simülasyonları için Eta-DynaForm 5.5 sonlu eleman analiz programı kullanılmıştır. Analizler için kullanılan kalıp sistemi Şekil 12'de görülmektedir. Sistem dişi kalıp, sac parça ve erkek kalıptan (zımba) oluşmaktadır. Ayrıca yapılan şekillendirme simülasyonları, program içerisinde bulunan farklı modeller kullanılarak yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simülasyon çözümlerinde power law plasticity (Model 18), piecewise linear plasticity (Model 24), anisotropic elastic plastic model (Model 37) ve Barlat - Lian (Model 36) modelleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 12  $60^\circ$  V kalıpta eğme modeli

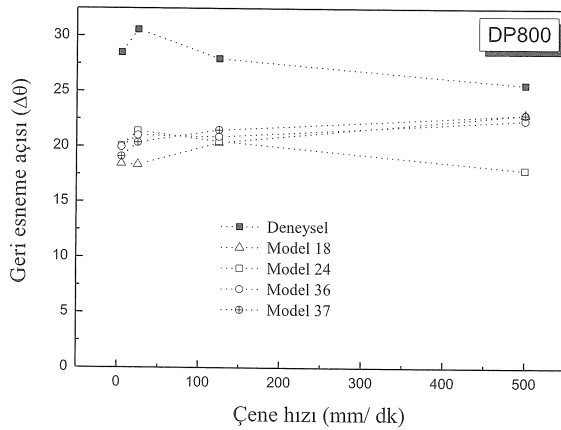
Bu çalışmada her parça yüzey olarak kendi boyutlarında modellenmiştir. Modelleme işlemi Catia V5 programı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizlerin daha sağlıklı sonuç vermesi için kendi malzeme kartları yerine bizim kendi ürettiğimiz malzeme kartları kullanılmıştır. Kullanılan dört farklı modelde bizim deneysel olarak elde ettiğimiz gerilme-birim deformasyon dataları, akma noktası, n, K değerleri kullanılmış, poisson oranı, yoğunluk ve

anizotropi vb. değerleri malzeme kartlarındaki değerler alınmıştır. Analizlerde dişi kalıp ve parça sabitken zimbaya hareket verilmiştir. Şekil 13' de Barlat – Lian (Model 36) modeli için malzemeye ait mekanik özelliklerin tanımlandığı kısımdan bir kesit görülmektedir.

MATERIAL TYPE 36	
MATERIAL TITLE	DP800
MASS DENSITY	7.800000E-009
YOUNGS MODULUS	2.160000E+004
POISSONS RATIO	3.300000E-001
HARDENING RULE(EXPON.)	3.000000E+000
MATERIAL PARAM P1 (K)	4.124000E+002
MATERIAL PARAM P2 (N)	2.550000E-001
EXPONENT FACE M	8.000000E+000
LANKFORD PARAM R00	7.700000E-001
LANKFORD PARAM R45	7.700000E-001
LANKFORD PARAM R90	7.700000E-001
FLD CURVE NUMBER	110

Şekil 13 Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Analizlerde iş parçası BELYTSCHKO-TSAY kabuk eleman kullanılarak 1312 elemente bölünmüş olup kalınlık boyunca da 5 bölüme ayrılmıştır. Eleman sayısı analiz sonuçlarını etkilemekle birlikte analiz sürelerini de artırmaktadır. Ayrıca şekillendirme simülasyonları esnasında deformasyonun fazla olduğu bölgelerde malzemede belirlenen ağ sisteminin daha küçük parçalara bölünerek çözümdeki hassasiyetin artırılması sağlanmıştır. Eğme simülasyonlarında eksplicit yöntem kullanılmaktadır. Geri esneme analizleri ise, eğme simülasyonlarından farklı olarak implisit yöntem ile çözülmektedir. Şekil 14'te farklı deformasyon hızlarında yapılmış simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 14 Deneysel veriler ve sonlu elamanlar modelleri arasındaki geri esneme farkları

Şekilden de görüldüğü üzere mevcut model sonuçları kendi içerisinde ve deneysel verilerle farklılıklar göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre geri esnemenin hıza bağlı değişimi, eğilim olarak Model 24'e (piecewise linear plasticity) benzer olmakla birlikte veriler arasında çok miktarda farklılıklar görülmektedir. Diğer modellerde eğilim verilerle yaklaşım görülmektedir. Sonuç olarak kullanılan hiç bir model geri esneme davranışını doğru istenilen doğrulukta tahmin edememiştir.

## SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada DP 800 çeliğinin farklı deformasyon hızlarında mekanik özelliklerindeki değişim ile birlikte deformasyon hızı ve sac kalınlığına bağlı olarak geri esneme davranışı incelenmiştir. Geri esneme davranışı sonlu elemanlar simülasyon programı kullanılarak da dört farklı malzeme modeli için modellenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Deformasyon hızının artmasıyla beraber akma ve çekme dayanımı artarken; toplam uzama ile çekleşme katsayısı değerleri azalmaktadır.

2. Malzemenin geri esneme davranışı artan deformasyon hızına bağlı olarak çok az miktarda azalmıştır.

3. Sac genişliğinin geri esneme üzerinde önemli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir.

4. Sonlu elemanlar simülasyon sonuçları deneysel verilerle uyumluluk göstermemiştir, sadece piecewise linear plasticity model eğilim olarak deneysel verilerle uyumludur.

5. Simülasyonlarda piecewise linear plasticity malzeme modeli hariç diğer modellerde, artan deformasyon hızı ile birlikte deneysel verilerle yaklaşma görülmüştür.

6. Kullandığımız malzemelere ait anizotropi değerleri ve poisson oranı bulunup, bu değerlerle analizler tekrar yapılarak anizotropi ve poisson oranının analizlere etkisinde bir sonraki çalışmamızda yapılacaktır.

## INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND SPRINGBACK BEHAVIOR FOR DP800 STEEL

In this study, the effect of deformation speed on mechanical properties and springback behavior for DP steel, which has an increased trend in its usage in automotive industry were investigated. Springback prediction was also determined using by ETA-Dynaform 5.5 program and results were compared with experiments. It is determined that springback was slightly decreased with increasing deformation speed and the size of sheet width has no effect on

springback. Finite element results were not in accord with experimental findings.

KeywordS: DP steels, DP800, dual phase steels, bending, springback, finite element analysis

#### KAYNAKÇA

1. Kleiner, M., Geiger, M., Klaus, A., Manufacturing of lightweight components by metal forming, 2003, *Annals of the CIRP*, 52/2, pp 521-542.
2. Kleiner, M., Chatti, S., Klaus, A., Metal forming techniques for lightweight construction, 2006, *J Mater. Proc Technol.*, 177, pp.2-7,
3. Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M., Sterzing, A., Sheet Metal Forming at Elevated Temperatures, 2006, *Annals of the CIRP*, 55/2, pp.793-816.
4. Llewellyn, D. T. and Hillis, D. J., Review: Dual Phase Steel, 1996, *Ironmaking and Steelmaking*, 23, 471-478.
5. Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U., determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies. 2008, *Mat&Des*, 29, pp. 1043-1050.
6. Imai, K., Koyama, J., Jin, Y., High-accuracy V-bending system by real time identifying material property. 2008, *J Mater. Proc Technol.*, 201, pp. 193-197.
7. Asnafi, N., Springback and fracture in v-die air bending of thick stainless steel sheets. 2000, *Mat&Des*, 21, pp. 217-236.
8. Leu, K.D., A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals. 1997, *J Mater. Proc Technol.*, 66, pp. 9-17.
9. Fei, D., Hodgson, P., Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels. 2006, *Nuclear engineering and design*, 236, pp. 1847-1851.
10. Li, X., Yang, Y., Wang, Y., Bao, Jun, Li, S., Effect of material hardening mode on the springback simulation accuracy of V-free bending. 2002, *J Mater. Proc Technol.*, 123, pp. 209-211.
11. Zhang, C.L., Lu, G., Leong, C.S., V-shaped sheet forming by deformable punches. 1997, *J Mater. Proc Technol.*, 63, pp. 134-139.
12. Romeu, G.L.M., Ciurana, J., Ferrer, I., springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work, 2007, *Mater. Proc Technol.*, 191, pp. 174-177.
13. S. I. Oh, Shiro Kobayashi, Finite element analysis of plane-strain sheet bending, 1980, *Int. J. of Mech.Sci.*, 22-9, 583-594.
14. N. Yamamura, T. Kuwabara, A. Makinouchi, M. Banu, C. Teodosiu, Springback simulation for hot-bending by the static explicit FEM code, using a new algorithm for cancelling the non-equilibrated forces, in: *Proceedings of the 2001 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity*, Tokyo, 2000, 101-104.
15. S.W. Lee, D.Y. Yang, An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process, 1998, *J. Mater. Process. Technol.* 80-81 p60-67.
16. N. Narasimhan, M. Lovell, Predicting springback in sheet metal forming: an explicit to implicit sequential solution procedure, 1999, *Finite Elements Anal. Des.* 33 p29-42.
17. D.W. Park, J.J. Kang, J.P. Hong, Springback simulation by combined method of explicit and implicit FEM, 1999, in: *Proceedings of NUMISHEET'99*, pp. 35-40.
18. K.P. Li, W.P. Carden, R.H. Wagoner, Simulation of springback, 2002, *Int. J. Mech. Sci.*, 44, p103-122.

## “MÜHENDİSLİK TASARIMI – Sistematik Yaklaşım” KİTABI

Tüm mühendislik kollarında, özellikle makine mühendisliği alanında “mühendislik tasarımı” konularında çalışan pek çok deneyimli mühendisin çok yakından bildiği ve yıllardır yararlandığı; bu konularda yetişmekte olan genç mühendislerin ise tanımakta olduğu çok önemli bir kitap Türkçe’ye çevrilerek anadilimizde yazılmış değerli bir kaynak olarak raflarda yerini almıştır. Sözünü ettiğimiz kitap Eylül 2010’da Hatiboğlu Yayınevi tarafından yayınlanan “*Mühendislik Tasarımı – Sistematik Tasarım*” adlı tasarım kitabıdır. Bu çeviri, Springer-Verlag Yayınevi yayınlarından “*Engineering Design – A Systematic Approach*” adlı eserin 3. İngilizce düzenlemesine dayanmaktadır. Bu tasarım kitabının orijinal adı “*Konstruktionslehre*” ve dili Almancadır. Prof. Dr. Gerhard Pahl ve Prof. Dr. Wolfgang Beitz tarafından hazırlanan bu kitabın birinci düzenlemesi 1977 yılında Almanya’da yayınlanmıştır. Bu eser; gerek Almanya ve de gerekse tüm dünyada mühendislik ve teknolojik tasarım/konstrüksiyon alanında literatürde yer alan en kapsamlı ve mükemmel bilimsel çalışma olarak kabul edilir ve bu konularda yapılan diğer çalışmaların/yayımların temel referansı olma özelliğini yıllardır korumaktadır. Ülkemizdeki çeşitli akademik çevre ve programlarda bu konu; “Metodik Konstrüksiyon”, “Sistematik Konstrüksiyon”, “Sistematik Tasarım”, “Konstrüksiyon Sistematiği” vb. gibi anılmakta ve bilinmektedir.

1977’den günümüze “*Konstruktionslehre*” kitabının 7 Almanca ve 3 İngilizce düzenlemesi yayınlanmıştır. Bu düzenlemelerle eser, daha kapsamlı ve güncel bilgiler içeren bir şekle dönüşmüştür. Özellikle son zamanlardaki bu çalışmalarda kitabın ilk yazarlarının öğrencileri Prof. Dr. –Ing. Jör Feldhusen ve Prof. Dr. –Ing. Karl-Heinrich Grote de görev almışlardır. Bu yeni yazarlar, Pahl / Beitz’in orijinal fikirlerini geliştirmiş ve genişletmişlerdir. MIT Makine Mühendisliği Bölümü’nden Prof. Dr. Warren Seering’in bu eser hakkındaki görüşü: “*tasarım yöntemlerine ait mevcut en mükemmel bilimsel çalışma olduğu ve tasarım işlemini anlamaya çalışan herkesin bu kitabın içeriği ile aşına olması*” şeklindedir.

“*Mühendislik Tasarımı*” kitabı, genel anlamda bir mühendislik tasarım problemini tümdengelim

yöntemiyle ele almakta ve bu problemin çözümü için geliştirilen sistematik bir yaklaşımı tanıtmaktadır.

Kitabın en önemli özelliklerinden biri sistematik tasarım yaklaşımının mühendislik disiplinlerinden bağımsız olması ve temel olarak genel anlamda “mühendislik tasarımı” problemine çözüm bulmak için kullanılacak bir yöntemi ortaya koymaktadır. Bu kitapta önerilen sistematik tasarım temel olarak “sistem yaklaşımı”, “teknik sistemler teorisi” ve “problem çözme süreci”ne dayanmaktadır. Kitapta yer alan örneklemelerin genellikle makine mühendisliği kapsamına giren sistemlerden seçilmiş olmasının nedeni, bu sistemlerin daha çok ürün odaklı ve bütünsel sistemler olması, geniş anlamda üretim süreçlerini de içermesidir; bu nedenle sistematik yaklaşımın bu sistemler aracılığıyla kavranması daha rahat olabilir. Ancak sistematik yaklaşım her tür mühendislik sisteminin tasarımı için kullanılacak bir yöntemidir.

Uluslararası alanda kabul görmüş olan bu eserin 3. İngilizce düzenlemesi yeni perspektifleri ve en güncel fikirleri içeren bölümlerle zenginleştirilmiştir. Bunlar; genişletilmiş ürün planlama, örgütsel yapılar, eşzamanlı mühendislik, liderlik ve ekip davranışına ait yeni kısımlar ile kalite yöntemleri ve maliyet tahminine ait güncel bölümleri içermektedir. Aşınmayı minimize etmek için tasarım, geri dönüşüm için tasarım, mekanik bağlantılar, mekatronik ve adaptronik konularına giren yeni örnekler eklenmiş ve mevcut olanlar genişletilmiştir.

“*Mühendislik Tasarımı*” kitabı, Prof. Dr. Hüseyin Rıza Börklü (Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü) tarafından 3. İngilizce düzenlemeden Türkçe’ye tercüme edilmiştir. Aynı eser, daha önce aralarında Çince, Japonca ve Portekizce de bulunan birçok dile çevrilmiştir. Bu Türkçe çeviri, eserin tercüme edildiği 9. farklı yabancı dildir.

Eserde mühendislik tasarımı ve sistematik tasarımın önemi ile ilgili genel bir girişin ardından aşağıda verilen konu başlıkları yer almaktadır:

- Teknik sistemlerin ve sistematik yaklaşımın temelleri
- Ürün planlama, çözüm bulma ve değerlendirme

- Ürün geliştirme işlemi
- Görevi açıkça belirleme
- Kavramsal tasarım
- Şekillendirme tasarımı
- Mekanik bağlantılar, mekatronik ve adaptronik
- Boyut aralıkları ve modüler ürünler
- Kalite için tasarım
- Minimum maliyet için tasarım

Mühendislik tasarım süreci temel olarak müşteri gereksinimlerine ve beklentilerine cevap veren işlevleri yerine getirecek ürün ya da sistemleri geliştirmeyi hedef almaktadır. Teknolojik gelişmeler, artan ve çeşitlenen müşteri gereksinimleri ve beklentileri son yıllarda ürün geliştirme süreçlerini önemli ölçüde etkilemiş, tasarımda ve üretimde yeni teknikler ve felsefelerin ortaya çıkmasına öncülük etmiştir. Günümüzdeki baş döndürücü teknolojik rekabet ortamı düşünüldüğünde üstün nitelik ve donanımlı mühendis ve teknik elemanlara olan gereksinim ön plana çıkmaktadır. Bu ise ancak onların daha iyi eğitim almaları, sürekli kendilerini

yenilemeleri ve güncel bilgiler öğrenmeleri, yeni gelişme ve değişimlere uyum sağlamalarıyla mümkündür "*Mühendislik Tasarımı - Sistemik Yaklaşım*" kitabı mühendislik müfredat programlarında yer alan tümleşik tasarım derslerinde kullanılabileceği gibi mühendislikler yanında tasarım ve konstrüksiyon öğretmenliği, makine eğitimi, endüstri ürünleri tasarımı ve meslek yüksek okullarına ait ilgili bölüm ve programların tasarım derslerinde de çok faydalı olabilir.

Bu kitap; gerek uygulamaya yönelik çalışan tasarımcılar, gerekse tüm mühendislik disiplinlerinden öğrenciler ve tasarım eğitimcileri için başarılı bir ürün geliştirme sürecinin sistemik yöntemini ayrıntılarıyla sunan kapsamlı bir temel kaynak kitap niteliğindedir.

Y. Doç. Dr. Zuhâl Erden

Atılım Üniversitesi

zuhal@atilim.edu.tr



## YAYIN İLKELERİ

### Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayımlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
4. Üniversite – endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
5. Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

### Kapsam

- (a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayımlar;

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 yayımlanacak makaleler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere araştırma makaleleri, uygulama makaleleri, derleme makaleleri, çeviri makaleleri ve kısa makaleler olabilir.
- (c) Dergide üyelerimize faydalı olabilecek imalat ve teknoloji ile ilgili araştırma ve çalışmaların sunulduğu veya firma ve kuruluşların tanıtıldığı yazılar yayımlanabilir.

- (d) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

### Makalelerin 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. Dergi'ye gelen her makale 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 makale yazarlarına bilgi verilecektir.

### YAYIN HAKKI

Dergide yayımlanan makalelerin her türlü yayın hakkı Makina Tasarım ve İmalat Derneği'ne aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

### ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, MAKİNA TASARIM VE İMALAT (MATİM) DERNEĞİ'dir.

"Dergi Yayın Kurulu" dergi yönetimi ile ilgili organdır. 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 ve onayını alır.

Journal of  
MECHANICAL  
DESIGN  
AND  
PRODUCTION

Journal of Mechanical Design and Production is a 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 standard.



## MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

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

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

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

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

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

## MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

### Yazım Dili

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

### Makalenin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

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

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

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

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

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

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

### Başlıklar

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

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

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

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

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

### Matematiksel Bağlantılar

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

### Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

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

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

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

### Dip Notu

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

### Kaynakça

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

Dergi Makalesi

1. Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376.

Kitap

2. Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.

Rapor

3. Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980.

Kongre Makalesi

4. Adalı, E. ve Tunali, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

### Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

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

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

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

### YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.

1. Örnek dip notu