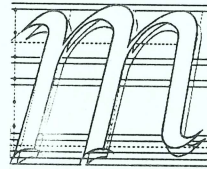


MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt : 3

Sayı : 3

Ekim 1997



matim

Makina Mühendisliği Bölümü
ODTÜ - ANKARA

Sahibi

Makina Tasarım ve İmalat Derneği adına Yönetim Kurulu Başkanı
Bilgin KAFTANOĞLU

O.D.T.Ü.

Yayın Kurulu

Günay ANLAŞ
Can ÇOĞUN
Haluk DARENDELİLER (Sorumlu Yayın Yönetmeni)
Zafer DURSUNKAYA
Levent PARNAS

Boğaziçi Ü.
Gazi Ü.
O.D.T.Ü.
O.D.T.Ü.
O.D.T.Ü.

Danışma Kurulu

Deniz AKÇALI
Metin AKKÖK
Mustafa AKKURT
Alpay ANKARA
M. A. Sahir ARIKAN
Tuna BALKAN
Sedat BAYSEÇ
Hakkı ESKİCİOĞLU
Hüseyin FİLİZ
Mustafa İ. GÖKLER
Erk İNGER
Ferruh ÖZTÜRK
Ömer SAATÇİOĞLU
O. Selçuk YAHŞI
R. Orhan YILDIRIM

Çukurova Ü.
O.D.T.Ü.
İ.T.Ü.
O.D.T.Ü.
O.D.T.Ü.
O.D.T.Ü.
Gaziantep Ü.
O.D.T.Ü.
Gaziantep Ü.
O.D.T.Ü.
Roketsan Gn. Md.
Uludağ Ü.
O.D.T.Ü.
O.D.T.Ü.
O.D.T.Ü.

Yazışma Adresi, Telefon ve Fax

Makina Tasarım ve İmalat Derneği
Makina Mühendisliği Bölümü, E Blok, No. 12
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

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

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 3 Sayı: 3 Ekim 1997

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 3 No: 3 October 1997

TELİF HAKKI

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

ABONE KOŞULLARI

Yıllık abone bedeli 1998 yılı içinde gerçek kişiler için 2.000.000 TL, firma ve kuruluşlar için 10.000.000 TL, öğrenciler için 1.000.000 TL'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 Derneğimize göndererek saptanacak bir katkı karşılığında Dergide yayınlanmasını sağlayabilirler.

BANKA HESAP NUMARASI

T. İş Bankası ODTÜ Şubesi
Hesap No: 4229 30441 235339

DİZGİ

Gülseren BEYAZ

BASKI

ODTÜ Basım İşliği

Yılda 2 ile 3 sayı yayınlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

- Derin Çekme İşleminde Eksenel Simetrik ve Kare
Taslakların Deneysel ve Sayısal İncelenmesi 103
Oktay YILDIRIM
Haluk DARENDELİLER
- Bir Arada Oluşan, Birbirine Dik İki Eksendeki
Eğilme Titreşimleri ve Burulma Titreşimlerinin
Analitik Modellenmesi 111
Yavuz YAMAN
- Yüzey Modellemede Kesişen Yüzeylerin Kesişme
Eğrisi Boyunca Kenar Geçiş Yüzeylerinin
Oluşturulması 121
Mustafa İ. GÖKLER
Cüneyt ÖZBAL
- Scara Tipi Endüstriyel Robot Hareketlerinin
Bilgisayar Destekli Programlarla Kontrolü 128
Necdet GEREN
Mustafa ERTÜRK
- Boruların Eksenel Buruşmasının Sonlu Elemanlar
Yöntemiyle Modellenmesi 134
Ali ÇOLAKOĞLU
- YAKIN GELECEKTEKİ KONGRE VE
BİLİMSEL ETKİNLİKLER 140

Sayın Okurlarımız,

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda yardımlarınızı beklemektedir. Bu sayımızda da ODTÜ Öğretim Elemanlarının makaleleri ağırlıklı olarak yer almıştır. Bunun en büyük nedeni diğer akademik kuruluşlar ve özellikle endüstrimizden yeteri kadar makalenin yayın kurulumuza gönderilmemiş olmasıdır.

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızdan da katkı beklemekteyiz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

Derin Çekme İşleminde Eksenel Simetrik ve Kare Taslakların Deneysel ve Sayısal İncelenmesi

Oktay Yıldırım
Makina Yüksek Mühendisi
Teknik Merkez
Trakmak Traktör ve Ziraat
Makinaları Tic. A.Ş.
06560 Gazi, ANKARA

Haluk Darendeliler
Doçent
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

Derin çekme işlemi sıkışma, gerilme, bükülme ve sürtünme etkilerinin birlikte olduğu sac malzemelerin şekillendirilmesi yöntemlerinden biridir. Sayısal çözüm yöntemleri ile, basit parçalar dışında, işlemin karmaşık yapısı nedeniyle bütün etkileri tamamen kapsayan çözüm elde etmek çok zordur. Bu nedenle, derin çekme işleminde halen deneme yanılma yöntemi de sayısal analiz ile birlikte kullanılmakta ve deneysel çalışmalar derin çekme işleminin incelenmesinde önem taşımaktadır. Bu çalışmada derin çekme işlemi deneysel olarak araştırılmış ve deney sonuçları sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sayısal sonuçlarla birlikte incelenmiştir.

GİRİŞ

Metal levha şekillendirme yöntemlerinden biri olan derin çekme, metal levhanın zımbayla kalıbın içersine doğru itilmesi ve bu sayede kalıp ve zımbanın çeperlerince şekillendirilmesiyle meydana gelir.

Derin çekmenin genel olarak bilinen en basit halinde dairesel bir taslak uygun kalıbın üzerinde ortalanarak yerleştirilir ve önceden belirlenen baskı plakası kuvveti uygulanır. Zımbanın ilerlemesiyle taslak en son halini alır. Üretilcek parçanın şekline göre, birden çok çekme işlemi gerekebilir. Derin çekme, gerilme, sıkışma, bükülme gibi karmaşık şekil değiştirme safhalarını içerdiğinden, işlemin tam bir analitik çözümü elde edilememiştir. Günümüzde, genellikle, deneme-yanılma yöntemi derin çekme işleminin analizinde kullanılmaktadır.

Genel anlamıyla derin çekme işlemini tanımlayan, ilk analitik ve deneysel çalışmaları Chung ve Swift [1,2,3] yapmıştır. Daha sonra, Woo [4,5] tarafından kuvvetlerin korunması, plastisite teorisi ve eksenel simetri sonucu oluşan gerinim bağıntısı prensipleri kullanılarak geniş bir araştırma yapılmıştır. Baskı plakası, kalıp ve zımbanın ucundaki temas sorununu da hesaba alarak çalışan Wifi [6] direkt artışı yöntem ile hesaplama zamanını azaltmış ve tutarlı sonuçlar elde etmiştir.

Crane [7] deneysel çalışmasında üç değişik çaptaki taslağa 15° açılı iki doğru çizmiş ve zımbanın altında iki doğrunun hiç bozulmadan aynı kaldığını görmüştür.

Ayrıca, derin çekilmiş taslağın duvarlarında iki çizginin paralel olduğunu ve kenarlara gidildikçe çizgilerin birbirlerine yaklaştığını gözlemlemiştir.

Yamada [8] eksenel simetrik olmayan işlemler için metal akışı, yırtılma özelliği ve şekillendirme limitini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada kalıbın karmaşık yapısı ve şekillenmemiş bölümlerin meydana getirdiği metal akışındaki düzensizliklerin, kalıp ile zımba arasında kalan bölge etrafında yırtılmaya neden olduğu görülmüştür. Hiraiwa ve Kondo [9] tarafından alüminyum ve alaşımları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar da limit çekme oranı (maksimum taslak çapının, zımba çapına olan oranı) araştırılmıştır. Kararsızlığın kalıp ile zımba arasındaki bölgede nominal gerilimin malzeme gerilme kuvvetine eşit olduğu zaman olduğu gözlemlenmiştir.

Genelde işlem karmaşık bir yapıda ve sayısal çözümlerin hesaplama zamanları uzun olduğundan, yapılan çalışmalar çoğunlukla çekme işlemini etkileyen parametreler üzerinde ayrı ayrı yoğunlaşmıştır. Yakın geçmişte bilgisayar alanında sağlanan gelişmeler sonucunda, sayısal çözümler üzerine yeni ve başarılı çalışmalar yapma olanağı bulunmuştur. Dairesel taslaklar için sayısal ve analitik olarak tam bir çözüm Kaftanoğlu tarafından gerçekleştirilmiştir [10].

Darendeliler ve Kaftanoğlu işlemi teorik olarak incelemiş ve sonlu elemanlar yöntemiyle derin çekme problemini çözen bir kod geliştirmişlerdir [11]. Yapılan bu çalışmada değişik malzemeler için çeşitli kalıp setleri kullanılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir.

Daha sonra, Yıldırım tarafından yapılan deneysel çalışmada bu geliştirilen kod ve Abaqus paket programı birlikte kullanılmış ve şekil değiştirme sonuçları karşılaştırılmıştır [12].

DERİN ÇEKME DENEYLERİ

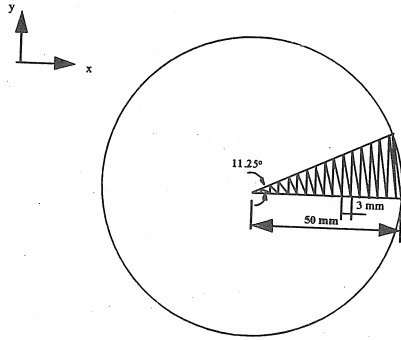
Bu çalışmada derin çekme işlemi üç kalıp seti kullanılarak incelenmiştir. Bu setlerden iki tanesi çapları birbirinden farklı aksenal simetrik kalıplardır. Zimba çapları, 45 mm ve 50 mm olan iki derin çekme seti de 1,5 mm kalınlığına kadar metal levhaların çekilmesinde kullanılabilir. Diğer kalıp ise 40mm x 40mm kare geometridedir ve 1 mm kalınlığına kadar olan metal levha çekme işlemleri için uygundur.

Malzeme olarak derin çekme çeliği ve pirinç kullanılmıştır. Bu malzemeleri sayısal analizlerde tanımlamak için derin çekme işleminden önce standart çekme testi yapılarak mekanik özellikleri bulunmuştur. Bu özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme Özellikleri

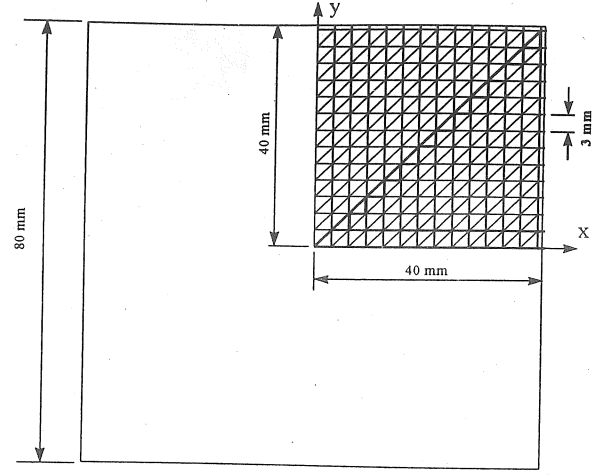
Malzeme	Çelik	Pirinç
Young modülü (E)	210 GPa	107 GPa
Poission oranı (ν)	0.3	0.3
Akma mukavemeti (σ)	155 MPa	285 MPa

Özellikleri test sonucu tesbit edilen malzemeler uygun kalıp şekillerinde kesilmiştir. Dairesel taslaklar 120 mm çapında, kare taslaklar 80 mm x 80 mm boyutlarında oluşturulmuştur. Hazırlanan taslaklardan daire olanlar merkezden 11.25° açıyla çizilen iki çizgiyle bölünmüş ve 3 mm'lik aralıklarla elemanlara ayrılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Dairesel Taslağın Çizimi

Kare taslağın ise simetriden dolayı dörtte biri seçilmiş ve üçgen elemanlara bölünmüştür (Şekil 2). Deneysel analizlerde kenarların orta noktası boyunca ve köşegen boyunca olan elemanlar kullanılarak ölçüm yapılmıştır.



Şekil 2. Kare Taslağın Çizimi

Bu yöntemle daire taslaklar için 33 nokta ve 31 eleman, kare taslaklarda ise 50 nokta ve 37 eleman elde edilmiştir. Sayısal analizlerde bu elemanlar için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Deneylerden önce tesbit edilen noktalar Üniversal mikroskopla ölçülmüş ve böylece ilk uzunluklar milimetrenin binde biri hassasiyetinde elde edilmiştir.

Deneyler sırasında malzemeler için 200 M'luk sabit baskı plakası kuvveti kullanılmış ve 10 mm/dak hızla çekme işlemi yapılmıştır. Taslaklar her deney seti için 25 mm'ye kadar çekme derinliği 5'er mm artırılarak 5 farklı derinlikte çekilmiştir. Deneylerden sonra, şekil değiştirmiş taslaklar elektrikli tel kesme makinası yardımıyla ölçüm çizgileri etrafından kesilmiştir. Bu sayede eldeki taslaklar mikrometre yardımıyla ölçülebilmüş ve şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir.

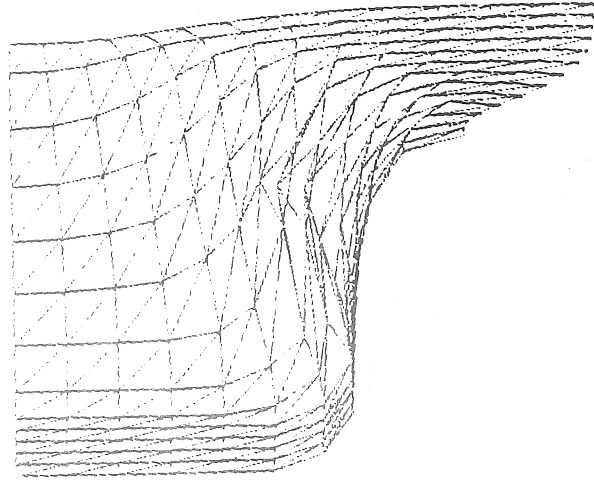
DENEYLERİN İNCELENMESİ

Derin çekme işleminde elde edilen deney sonuçlarını karşılaştırmak için Abaqus [13] ve Darendeliler [14] tarafından geliştirilen sonlu elemanlar yöntemini içeren kod (SEY) kullanılmıştır.

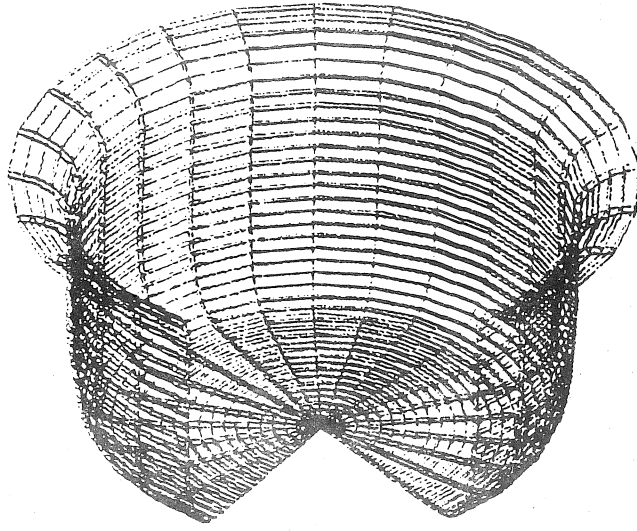
Abaqus yazılımı belli yapıdaki girdi dosyasını analiz eden bir çok programın birleşiminden oluşmaktadır. Girdi dosyası genel olarak model ve işlem bilgilerinden oluşur. Model bilgilerinde sonlu eleman tanımları, elemanın, noktaların ve malzemenin özellikleri belirtilir. İşlem bilgileri bölümünde ise tanımlanan modelle ne yapılacağı, işlemlerin sırası ve ne tür analizlerin yapılacağı belirtilir. Abaqus programı sonucu elde edilen deforme olmuş kare ve daire taslak çizimleri Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmiştir.

SEY programı ise standart bir girdi dosyası kullanarak analiz yapmakta ve yine standart çıktı dosyasını oluşturmaktadır. Şekil 5'de kare taslak için elde edilen sonuçlar görülmektedir.

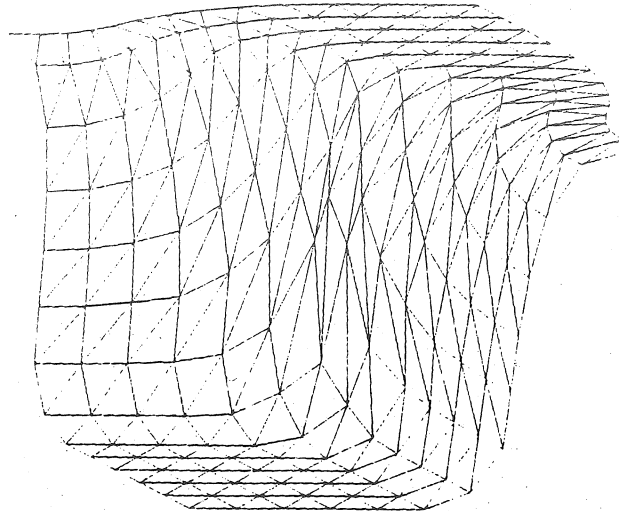
Çekme deneyinden ve sayısal analizler sonucunda elde edilen sonuçlar kalınlık yönündeki şekil değiştirme kullanılarak grafiklere dökülmüş ve karşılaştırmalar



Şekil 3. Abaqus Programı Kullanılarak Elde Edilen Şekil Değiştirmiş Kare Taslak



Şekil 4. Abaqus Programı Kullanılarak Elde Edilen Şekil Değiştirmiş Daire Taslak



Şekil 5. SEY Kod Kullanılarak Elde Edilen Şekil Değiştirmiş Kare Taslak

yapılmıştır. Grafikler çizilirken taslak merkezine olan ilk uzaklıklar baz alınmış ve kare taslaklar için kenarların orta noktası ve köşegen boyunca olmak üzere iki ayrı grafik çizilmiştir.

Eksenel simetrik kalıplarla çekilmiş taslaklar zımbanın altında incelererek kalınlık yönünde sabit veya negatif gerinim göstermiştir. Zımbanın kenarına yaklaştıkça inceltme artmakta ve zımba köşesine yakın bir yerde en büyük değerini almaktadır. Daha sonra zımbanın kenarı ile kalıbın kenarı arasındaki bölgede inceltme kalıbın kenarına doğru azalmakta ve kalıpla baskı plakası arasındaki bölgede kalınlaşma görülmektedir. Abaqus ve SEY Kod kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde yakın değerler görülmektedir (Şekil 6, 7, 8 ve 9). Abaqus ile elde edilen sonuçlarda zımbanın köşesine taslak yapışmakta ve şekillerden de anlaşılacağı gibi ani değişiklikler olmaktadır.

Kare taslaklarda kenarların orta noktaları arasında kalınlıklar karşılaştırıldığında, zımbanın altından zımbanın köşesine kadar kalınlıkta az miktarda inceltme görülmektedir (Şekil 10a - 11a). Zımbanın kenarında en fazla inceltmeye ulaşan taslak, zımba ile kalıp arasındaki alanda azalan bir inceltme göstermiştir. Kalıp ile baskı plakası arasındaki bölgede kalınlaşma görülmekte ve taslağın kenarında en büyük kalınlık değeri elde edilmektedir. SEY Kod'dan elde edilen kalınlık yönündeki gerinim değerleri yüksek olmakla birlikte aynı eğilimi göstermektedir. Abaqus sonuçlarında ise zımbanın köşesinde oluşan yapışma etkisinin bu bölgede taslağın deformasyonunu engellediği görülmüştür.

Köşegen boyunca bakıldığında yine zımbanın altındaki bölgede hafif bir inceltme gözlemlenmekte ve zımbanın köşesinde en az kalınlık elde edilmektedir. Zımba ile kalıp arasındaki bölgede ilk duruma göre inceltme olmakla birlikte kalınlık yönündeki gerinimde artış eğilimi görülmektedir. Kalıbın köşesiyle baskı plakası arasındaki alanda kalınlığın ilk değerinin üzerine çıktığı ve en fazla kalınlık elde edildikten sonra azalan bir eğilimle taslağın kenarında ilk değerine ulaştığı gözlemlenmektedir.

SONUÇLAR

Deneylerin sonuçlarının incelenmesi ve analizlerle karşılaştırılması neticesinde şu sonuçlar elde edilmiştir.

1. Eksenel simetrik derin çekme işleminde zımbanın altında az miktarda inceltme görülmektedir. En büyük inceltme köşe etrafında görülmekte ve daha sonra inceltme hızla azalmaktadır. Baskı plakası ile kalıp arasında kalınlaşma gösteren taslak, kenarda en büyük kalınlığa erişmektedir.

2. Kenarların orta noktası boyunca karşılaştırılan şekil değiştirmiş kare taslak zımba altında gösterdiği inceltmeden sonra en ince değerine zımba kenarında ulaşmakta ve daha sonra hızlı bir değişimle kalınlık artmaktadır. Kalıp ile baskı plakası arasında, kalınlık ilk değerine göre daha fazladır. Taslak çevresinde en büyük kalınlık elde edilmiştir.

3. Köşegen boyunca incelenen çekilmiş kare taslakta ise zımbanın altında yine bir inceltme gözlemlenmiştir. Kalınlık yönündeki gerinim, zımba ile kalıp arasında artmaktadır. Taslak kenarında kalınlık yönündeki gerinim sifira yaklaşmaktadır.

4. Kare ve eksenel simetrik taslaklar zımba altında tüm analizlerde (Deney-Abaqus-SEY Kod) aynı sonuçları vermiştir.

5. Kalıp ile baskı plakası arasındaki bölgede tüm analizler aynı eğilimi göstermişlerdir.

6. Bütün eksenel simetrik derin çekme işlemlerinde tüm derinlikler için en fazla kalınlaşma taslak kenarında görülmüştür.

7. Bütün eksenel simetrik derin çekme işlemlerinde tüm derinlikler için en fazla inceltme zımba köşesinde görülmüştür.

8. Abaqus ve SEY Kod sonuçları deney sonuçları ile aynı eğilimi göstermişlerdir.

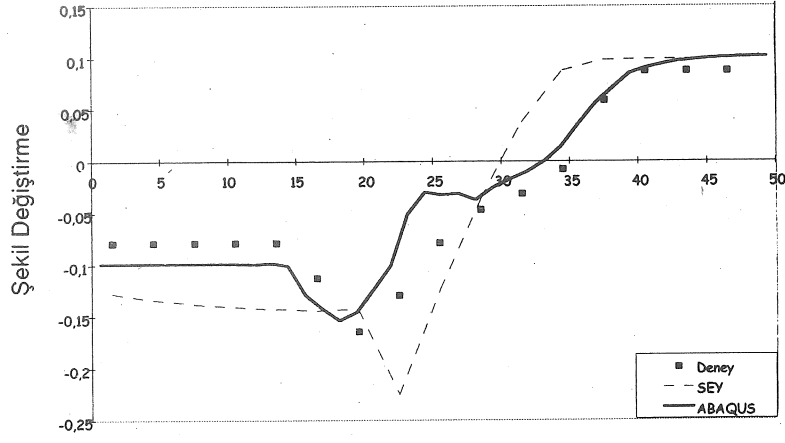
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF AXISYMMETRICAL AND SQUARE BLANKS IN DEEP DRAWING

The deep drawing process is a forming operation of the sheet metals in which friction, stretching, unbending, bending, and compression occur simultaneously during the process. Although numerical analysis has been made for the solution at all the stages of the process; because of its complex nature, obtaining a complete solution of the process is very difficult and the numerical solutions would not be sufficient to represent the process for complex parts. Therefore in the deep drawing process, the trial and error method is still used with the numerical analysis. So, experimental study plays an important role in analyzing the deep drawing process.

In this study, the deep drawing process is analyzed experimentally and experimental results are compared with the results obtained by the finite element method.

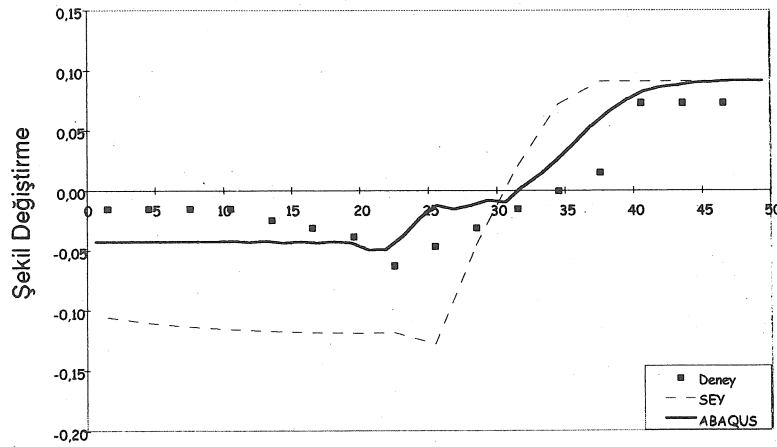
KAYNAKÇA

1. Swift, H.W., *Plastic Strain in an Isotropic Strain Hardening Material*, Engineering, No. 162, 1947, 381.
2. Swift, H.W., *Two Stage Drawing of Cylindrical Cups*, *Trans. Institute of Eng. Slip in Scotland*, No. 86, 1943, 195-196.
3. Chung, S.Y. and Swift, H.W., *Cup Drawing from a Flat Blank*, *Proc. Inc. Mechanical Engineers*, V.169, No. 199, 1951.
4. Woo, D.M., *On the Complete Solution of the Deep Drawing Problem*, *Int. J. Mech. Science*, Pergamon Press, Vol.10, 1967, 83-94.
5. Woo, D.M., *Analysis of the Cup Drawing Process*, *J. of Mechanical Engineering Science*, 1964, Vol.6.



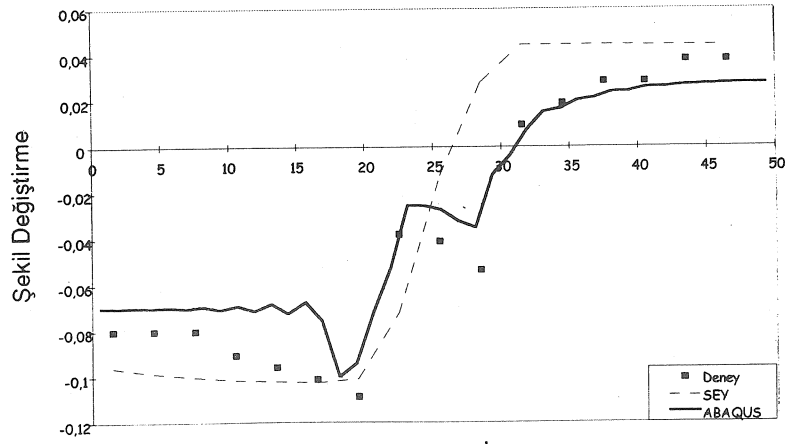
Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık

Şekil 6. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 45 mm Çaplı Zimba ile 23 mm Çekme Derinliğindeki Çelik için Karşılaştırılması



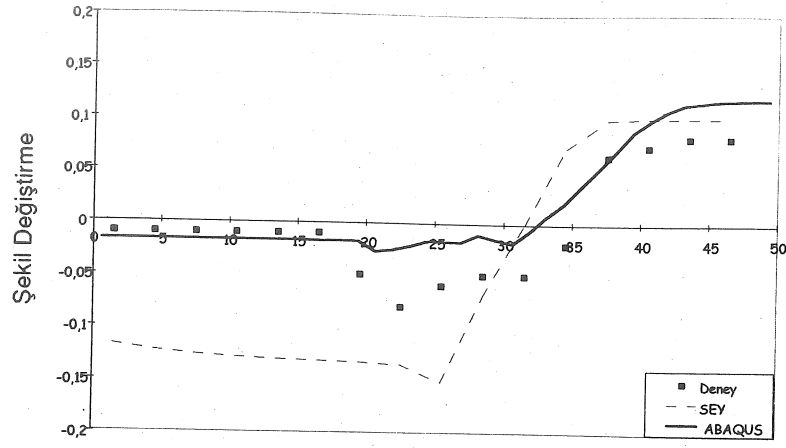
Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık

Şekil 7. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 50 mm Çaplı Zimba ile 20 mm Çekme Derinliğindeki Çelik için Karşılaştırılması



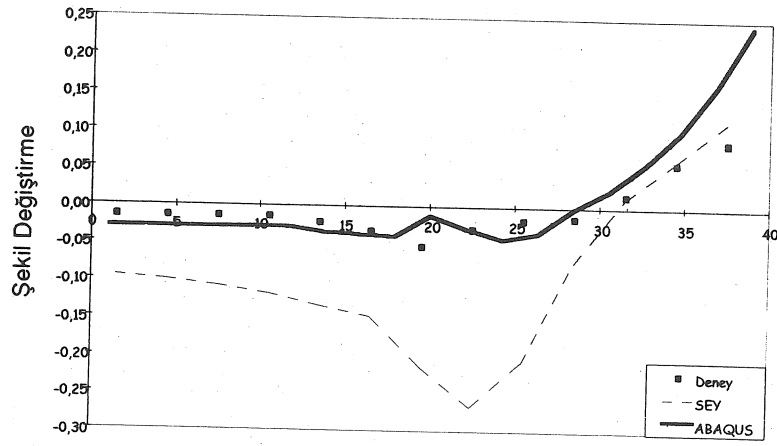
Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık

Şekil 8. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 45 mm Çaplı Zimba ile 13 mm Çekme Derinliğindeki Pirinç için Karşılaştırılması

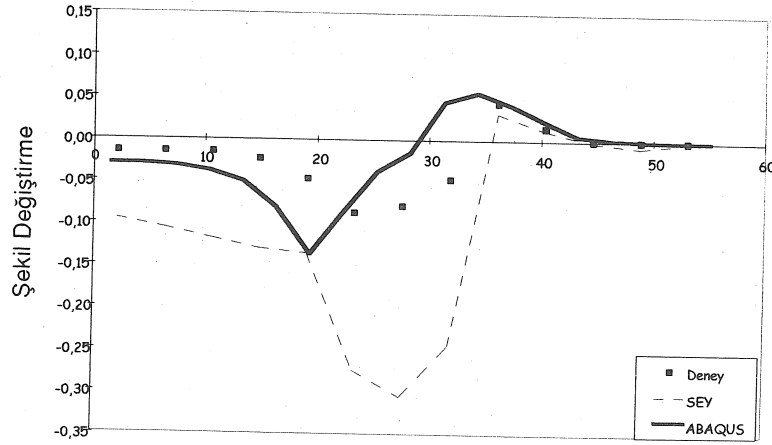


Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık

Şekil 9. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 50 mm Çaplı Zimba ile 20 mm Çekme Derinliğindeki Pirinç için Karşılaştırılması

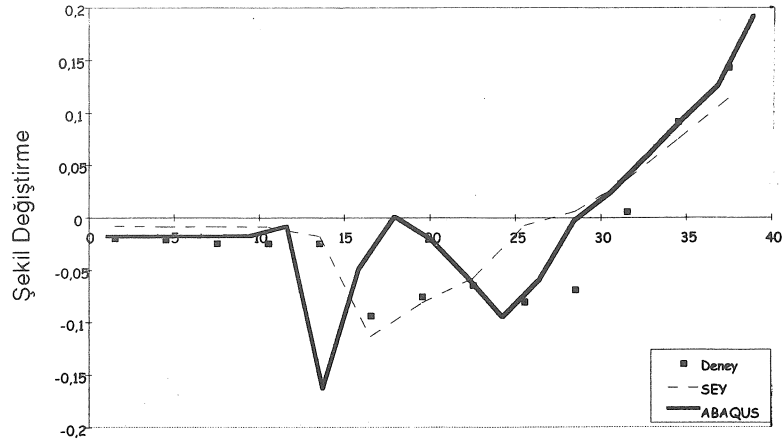


Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık
(a)

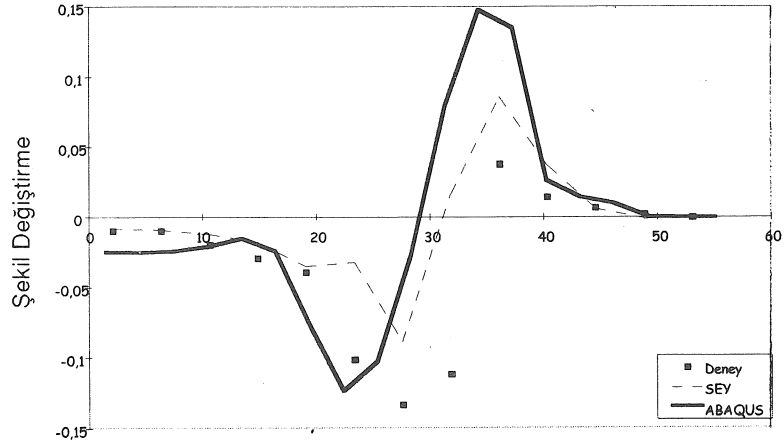


Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık
(b)

Şekil 10. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 16 mm Çekme Derinliğindeki Çelik için (a) Kenarların Orta Noktası Arasında, (b) Köşegen Boyunca Karşılaştırılması



Taslak Merkezine Olan ilk Uzaklık
(a)



Taslak Merkezine Olan ilk Uzaklık
(b)

Şekil 11. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 16 mm Çekme Derinliğindeki Çelik için
(a) Kenarların Orta Noktası Arasında, (b) Köşegen Boyunca Karşılaştırılması

6. Wifi, A.S., An Incremental Complete Solution of the Stretch Forming Deep Drawing of a Circular Blank, Using a Hemispherical Punch", *Int. J. Mech. Science*, Pergamon Press, Vol.14, 1976, 23-31.
7. Crane, V., *Plastic Working of Metals and Non-metallic Materials in Presses*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1954, 150-212.
8. Yamada, Y., *Studies on Formability of Sheet Metals*, Inst. Inds. Science Univ. of Tokyo, V.11, No: 5, 1969.
9. Hiraiwa, M., Kondo, K., *On the Characteristics of Square Cup Drawing* *Bulletin of JSME*, Vol.26, 1985, 2287-2294.

10. Kaftanoğlu, B., An Investigation of Stretch Forming in Relation to Deep Drawing and Testing Sheet Metal, *Ph.D. Thesis*, Imperial College, University of London, 1966.
11. Darendeliler, H., Kaftanoğlu, B., Deformation Analysis of Deep Drawing by a Finite Element Method, *Annals of the CIRP*, Vol.40, No.1, 1991, 281-284.
12. Yıldırım, R.O., Experimental and Numerical Analysis of Deep Drawing, *M.Sc. Thesis*, Middle East Technical University, Ankara, 1997.
13. ABAQUSEXAMPLE REFERANCE MANUAL.
14. Darendeliler, H., Computer Aided Deformation Analysis of Deep Drawing Process, *Ph.D Thesis*, Middle East Technical University, Ankara, 1991.

Yavuz Yaman
Doçent
Havacılık Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

Bir Arada Oluşan, Birbirine Dik İki Eksendeki Eğilme Titreşimleri ve Burulma Titreşimlerinin Analitik Modellenmesi

Bu çalışmada kütle merkezi ve kayma merkezi çakışmayan bir açık kesitli kirişin, zorlanmış titreşimlerinin incelenmesi için geliştirilen yeni bir analitik model tanıtılmaktadır. Kirişin birbirine dik iki eksendeki eğilme titreşimleri ve burulma titreşimleri birarada oluşmaktadır. Sunulan analitik model, dalga yayını teorisi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu çalışma, modelin tanıtılması amacıyla yalnız basit mesnetli uçlar için hazırlanmış ve kesitteki buruşmanın etkisi göz önünde tutulmamıştır. Çalışmada, zorlama noktasal harmonik kuvvet olarak alınmıştır. Kiriş Euler-Bernoulli kirişi olarak varsayılmıştır.

GİRİŞ

Açık kesitli kirişler, havacılık yapılarında direnç arttırıcı olarak (stiffeners) yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu tür kirişlerin kullanıldığı uygulamaların sonucunda, genelde kiriş kesitlerin kütle ve kayma merkezleri çakışmamakta ve eğilme titreşimleri ile burulma titreşimleri birarada oluşmaktadır. Bu olgu kirişlerin ve bağlı buldukları yüzeylerin dinamik davranışlarını etkilemekte ve özellikle belli frekans aralıklarında kiriş davranışının tüm yapıyı yönlendirdiği göz önüne alınırsa, son derece önemli olmaktadır.

Açık kesitli kirişlerin dinamik davranışlarını inceleyen ilk araştırmacılardan biri Gere [1,2] olmuş ve birarada oluşan titreşimlerin özdeğerlerini basit mesnetli uçlar için saptamıştır. Dokumacı [3], bir eksene göre simetrik durumlar için, özdeğerleri ve öz vektörleri belirleyen bir analitik model geliştirmiştir. Ancak bu çalışmalar serbest titreşim özelliklerini incelemekle sınırlı kalmışlardır.

Mead [4] tarafından önerilen ve Yaman'ın geliştirdiği [5] dalga yayını yaklaşımı (wave propagation approach) sabit kalınlığa sahip kiriş ve plak yapılarının zorlanmış titreşimlerinin incelenmesinde çok olumlu sonuçlar vermiştir [6].

Özellikle birden fazla noktada desteklenen yapılarda ve desteklerin kütle ve direnç özelliklerinin (inertia and stiffness properties of stiffeners) önem kazandığı karmaşık durumlarda önerilen kesin analitik yaklaşımın sonuçları, deneysel sonuçlarla çok uyumlu bulunmuştur [7].

Yaman, dalga yayını yaklaşımı kullanarak, bir eksene göre simetrik, açık kesitli kirişlerin bir arada oluşan zorlanmış eğilme ve burulma titreşimlerinin incelenmesinde kolaylık sağlayan yeni bir analitik yöntem geliştirmiş ve bunu basit mesnetli, kilitli ve serbest uçlar için uygulamıştır [8,9].

Bu çalışmada iki eksene göre de simetrik olmayan açık kesitli kirişler ele alınmıştır. Kütle merkezi ve kayma merkezinin çakışmamasından dolayı, birbirine dik iki eksende olan eğilme titreşimleri (bending vibrations), burulma titreşimleri (torsional vibrations) ile bir arada oluşmakta ve üçlü bağlaşma (triple-coupling) olarak tanımlanabilen durum oluşmaktadır. Dalga yayını teorisi yardımıyla birarada oluşan titreşimler birbirleri cinsinden ifade edilebilmektedir. Çalışma, yöntemin tanıtılması amacıyla, sadece basit mesnetli uçları içermekle birlikte; önerilen yöntem klasik olmayan sınır koşulları için de kullanılabilir. Çalışma, yöntemin tanıtılması amacıyla, sadece basit mesnetli uçları içermekle birlikte; önerilen yöntem klasik olmayan sınır koşulları için de kullanılabilir.

TEORİ

Şekil 1'de verilen kesiti göz önüne alalım. Şekilde C kütle merkezini, O kayma merkezini, c_y ve c_z kütle ve kayma merkezi arasındaki kaçıklıkları, w ve v sırasıyla, kayma merkezinden geçen, z ve y yönlerindeki dikey yer değiştirmeleri göstermektedir. v ve ξ , C'den geçen eksen takımıdır. Kütle merkezine uygulanan bir dikey yük (transverse load) kayma merkezine göre hem dikey yük, hem de tork etkisi yaratır ve bu da titreşimlerin bağlaşmasına neden olur. Buna göre kirişin hareket denklemleri, birarada oluşan üç denklem cinsinden bulunur [1, 2].

$$\begin{aligned} EI_{\xi} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI_{v\xi} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + c_y \rho A \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} &= 0 \\ EI_{v} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + EI_{v\xi} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + c_z \rho A \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} &= 0 \\ -GJ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \rho I_o \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + c_y \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_z \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Burada EI_{ξ} , z yönündeki ve EI_{v} , y yönündeki dikey direngenlikleri, $EI_{v\xi}$ yz yönlerindeki dikey bağlaşma direngenliğini, GJ burulma sabitini, I_o kayma merkezine göre polar eylemsizlik momentini, ρ kiriş malzeme yoğunluğunu, E Young modülünü, A kiriş sabit kesit alanını, ϕ burulmayı, t zamanı simgelemektedir.

Bu denklem takımı üçlü bağlaşmayı tanımlamaktadır. y ve z yönlerindeki titreşimler arasında direngenlik bağlaşması (stiffness coupling), w ile ϕ ve v ile ϕ titreşimleri arasında ise kütleli bağlaşma (mass coupling) bulunmaktadır.

Dikey yer değiştirmeler ve burulma, $w(x, t) = w_n e^{k_n x} e^{i\omega t}$

$$v(x, t) = v_n e^{k_n x} e^{i\omega t}$$

$$\phi(x, t) = \phi_n e^{k_n x} e^{i\omega t} \quad (2)$$

olarak ifade edilebilir [4]. Burada w_n , v_n ve ϕ_n n 'inci büyüklükleri, k_n n 'inci dalga sayısını, ω açısal frekansı belirtmektedir. Eğer bağıntılar (1) ve (2) birlikte kullanılırsa, aşağıdaki matris denklemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} EI_{\xi} k_n^4 - m\omega^2 & EI_{v\xi} k_n^4 & -c_y m\omega^2 \\ EI_{v\xi} k_n^4 & EI_{v} k_n^4 - m\omega^2 & -c_z m\omega^2 \\ -c_y m\omega^2 & -c_z m\omega^2 & -GJ k_n^2 - \rho I_o \omega^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} w_n \\ v_n \\ \phi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Bu denklemde m birim uzunluk boyunca kütleyi simgelemektedir ($m = \rho A$).

Matrisin açılımı aşağıdaki onuncu dereceden dalga sayısı, k_n , denklemini verir.

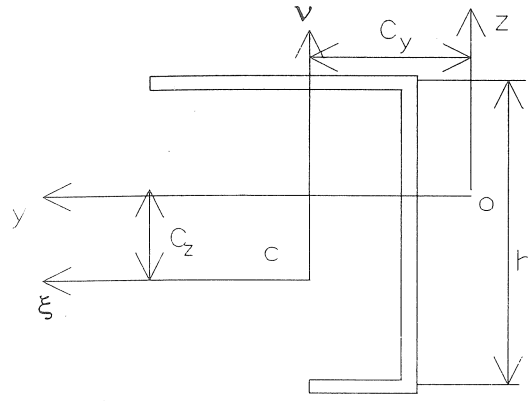
$$\begin{aligned} &\left\{ (GJ) \left((EI_{\xi}) (EI_{v}) - (EI_{v\xi})^2 \right) \right\} k_n^{10} \\ &+ \left\{ (\rho I_o \omega^2) \left((EI_{\xi}) (EI_{v}) - (EI_{v\xi})^2 \right) \right\} k_n^8 \\ &- \left\{ (GJ) (m\omega^2) (EI_{\xi} + EI_{v}) \right\} k_n^6 \\ &- \left\{ (\rho I_o \omega^2) (m\omega^2) (EI_{\xi} + EI_{v}) \right. \\ &- \left. \left((EI_{\xi}) (c_z^2) + (EI_{v}) (c_y^2) - 2 (EI_{v\xi}) (c_z c_y) \right) (m\omega^2)^2 \right\} k_n^4 \\ &+ \left\{ (GJ) (m\omega^2)^2 \right\} k_n^2 \\ &- \left\{ (m\omega^2)^3 (c_z^2 + c_y^2) - (\rho I_o \omega^2) (m\omega^2)^2 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

şimdi Şekil 2'yi göz önünde tutalım. Dalga yayını teorisine göre sabit kalınlıkta, sonsuz uzunluktaki, sönümsüz bir kirişin $x=0$ noktasında harmonik bir noktasal kuvvetle (F_o) zorlanması sonucu her iki yöne ilerleyen ikişer dalga oluşur. Dalgaların toplamı hareket denkleminin derecesine eşit olmaktadır. Bir yönde ilerleyen dalgalardan biri çabuk sönen (near-field), diğeri ise taşınan (propagating) tipte dalgadır. Buna göre kirişin herhangi bir x noktasındaki dikey yer değiştirme (transverse displacement), aşağıdaki şekilde bulunur [4].

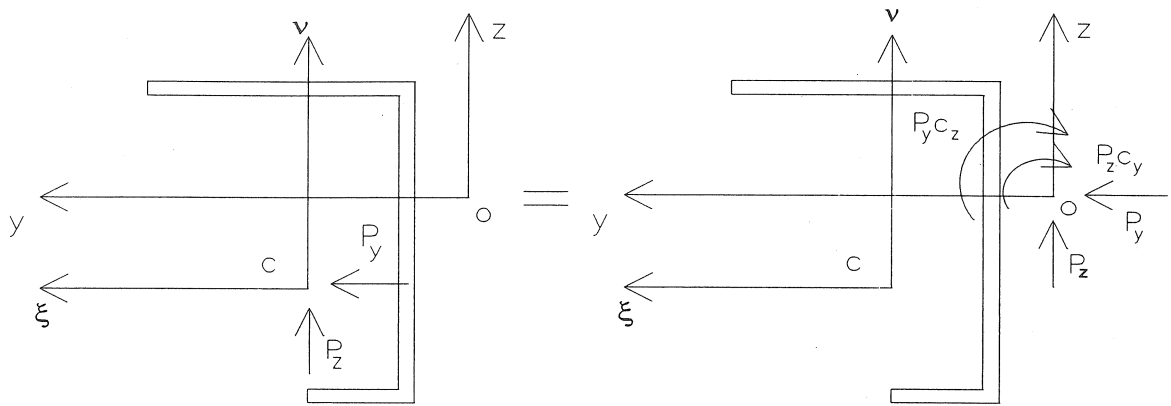
$$w(x, t) = F_o \sum_{n=1}^2 a_n e^{-k_n x} e^{i\omega t} \quad (5)$$

Burada k_n n 'inci kiriş dalga sayısını, a_n ise kuvvetin uygulandığı noktadaki uyumluluk ve süreklilik koşullarının sağlanmasıyla bulunan ve sistem parametreleri ile frekans cinsinden elde edilen n 'inci katsayıyı göstermektedir [4].

Aynı yaklaşım üçlü bağlaşmaya uğramış kiriş uygulanırsa, herhangi bir noktasal zorlama sonucu her iki yönde beşer dalganın yol alması gerektiği bulunur. Bağntı (4), yapıda on adet dalga olduğunu, bunlardan beşinin pozitif x , diğer beşinin de negatif x yönünde yayındığını göstermektedir. Bir yönde ilerleyen beş dalganın dördü eğilme dalgalarını, beşincisi ise burulma dalgasını simgelemektedir. Eğilme ve burulma

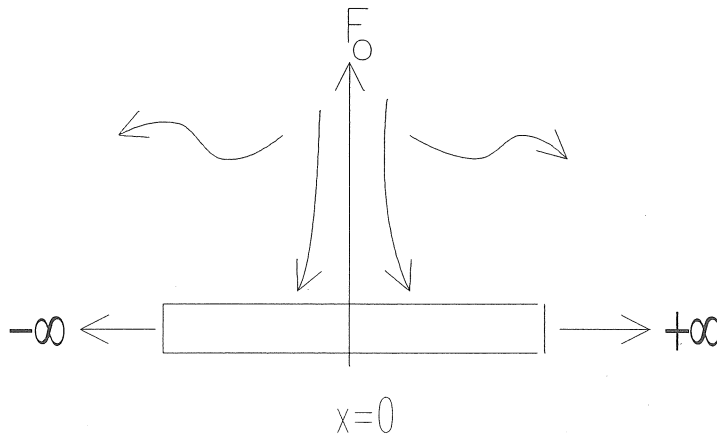


(a)



(b)

Şekil 1. Kütle Merkezi ve Kayma Merkezi Çakışmayan Kiriş Kesiti (a) Koordinat Sistemi, (b) Gerçek ve Etkin Zorlamalar



Şekil 2. Sabit Kalınlıkta, Sonsuz Uzunlukta, Sönümsüz Euler-Bernouilli Kiriş Uygulanan Noktasal Dikey Zorlamanın Yaratdığı Dalgalar

titreşimlerinin bir arada oluşmadığı varsayılırsa, z yönündeki titreşimler için dört, y yönündeki titreşimler için dört ve burulma için iki dalga oluşacağı ve üç grubunda bağımsız olarak değerlendirilmesi gerektiği belirgindir. Ancak bağlaşmanın varlığı bu on dalganın birbirlerini etkileyip bir arada oluşmalarına neden olmaktadır.

Buna göre, kütle merkezinden geçen, z yönündeki P_z dikey kuvveti sonsuz ve sabit kalınlığa sahip bir kirişte, herhangi bir x noktasında aşağıda verilen tepkeleri (response) oluşturur.

$$w(x) = P_z \sum_{n=1}^5 a_n e^{-k_n x}$$

$$v(x) = P_z \sum_{n=1}^5 b_n e^{-k_n x}$$

$$\phi(x) = P_z \sum_{n=1}^5 c_n e^{-k_n x}$$

a_n değerleri, direngenlik bağlaşması olmayan durumlarda, aşağıda belirtilen uyumluluk ve süreklilik koşullarının sağlanmasıyla oluşturulacak matris denkleminin sayısal çözümü ile elde edilir.

$$EI_\xi \left. \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right|_{x=0} = \frac{P_z}{2}$$

$$\left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

$$EI_\nu \left. \frac{d^3 v}{dx^3} \right|_{x=0} = 0$$

$$\left. \frac{dv}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

$$GJ \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=0} = \frac{P_z c_y}{2} \quad (7)$$

Gerekli olan b_n ve c_n değerleri, tüm bağlaşmalar gözönünde tutulduğunda, bağıntılar (2) ve (3) kullanılarak a_n cinsinden bulunur.

$$b_n = \Pi_n a_n$$

$$c_n = \zeta_n a_n$$

$$\Pi_n = - \frac{\left(EI_\xi k_n^4 - m\omega^2 \right) \left(GJk_n^2 + \rho I_{O\omega}^2 \right) + \left(-c_y m\omega^2 \right)^2}{\left(-c_y m\omega^2 \right) \left(-c_z m\omega^2 \right) + \left(EI_{\nu\xi} k_n^4 \right) \left(GJk_n^2 + \rho I_{O\omega}^2 \right)}$$

$$\zeta_n = \frac{\left(EI_\xi k_n^4 - m\omega^2 \right) \left(EI_{\nu} k_n^4 - m\omega^2 \right) - \left(EI_{\nu\xi} k_n^4 \right)^2}{\left(EI_{\nu\xi} k_n^4 \right) \left(-c_z m\omega^2 \right) - \left(-c_y m\omega^2 \right) \left(EI_{\nu} k_n^4 - m\omega^2 \right)}$$

(8)

Eğer dikey yükleme sadece y yönünde olursa, ya da aynı zamanda hem y hem de z yönlerinde gerçekleşirse, bağıntı (7)'de kullanılan sınır koşulları yeniden düzenlenmelidir.

Zorlama sonucu yayılan dalgalar, uçlardan yansır. Serbest dalgalar olarak adlandırılan bu dalgaların kirişin herhangi bir x noktasında yarattığı, z yönündeki, dikey yer değiştirme

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{10} A_n e^{k_n x} e^{i\omega t} \quad (9)$$

bağıntısından bulunur.

Kirişteki toplam dikey yer değiştirme, zorlanmış ve serbest dalgaların etkileri bir arada tutularak belirlenir. Buna göre, sadece P_z kuvveti etkideğinde, dikey değiştirmeler ve burulma aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{10} A_n e^{k_n x} e^{i\omega t} + P_z \sum_{n=1}^5 a_n e^{-k_n |x_f - x|}$$

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{10} \Pi_n A_n e^{k_n x} e^{i\omega t} + P_z \sum_{n=1}^5 b_n e^{-k_n |x_f - x|}$$

$$\phi(x, t) = \sum_{n=1}^{10} \zeta_n A_n e^{k_n x} e^{i\omega t} + P_z \sum_{n=1}^5 c_n e^{-k_n |x_f - x|}$$

(10)

Burada x_f kuvvetin uygulandığı noktayı simgelemektedir.

A_n değerleri kirişin uçlarındaki sınır koşullarının sağlanmasıyla elde edilecek olan serbest dalga genlikleridir. Basit mesnetli uçlar için gerekli sınır koşulları şunlardır [1, 2].

$$w(0) = w(L) = 0$$

$$w''(0) = w''(L) = 0$$

$$v(0) = v(L) = 0$$

$$v''(0) = v''(L) = 0$$

$$\phi(0) = \phi(L) = 0$$

(11)

Bağıntı (10)'da verilen w , v ve ϕ ifadeleri bağıntı (11)'de verilen koşulları sağlarsa, sonuç onuncu dereceden bir matris denklemi haline dönüşür. Bu denklemin sayısal olarak çözümü ile elde edilecek A_n değerleri bağıntı (10)'da kullanılırsa P_z zorlamasına karşılık kirişin herhangi bir x noktasındaki, gerek duyulan, tepke belirlenir.

UYGULAMALAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan model aşağıdaki değerlere sahiptir.

$$L = 1 \text{ (m)}, A = 9.68 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^2\text{)}, h = 38.10 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}, \\ I_v = 5.08 \cdot 10^{-9} \text{ (m}^4\text{)}, I_x = 2.24 \cdot 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}, \\ I_{v_x} = 4.25 \cdot 10^{-9} \text{ (m}^4\text{)}, c_y = 10.43 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}, \\ c_z = 9.09 \cdot 10^{-3} \text{ (m)}, J = 5.20 \cdot 10^{-11} \text{ (m}^3\text{)}, \\ I_o = 4.60 \cdot 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}, \rho = 2700 \text{ (kg/m}^3\text{)}, \\ E = 7 \cdot 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}, G = 2.6 \cdot 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Olası sönüm (η) sadece eğilme titreşimleri için ele alınmış ve $EI_x = EI_x (1+i\eta)$ ve $EI_v = EI_v (1+i\eta)$ olarak işlemlere katılmıştır.

Çalışmada öncelikle bağlaşıklık dalga sayıları (coupled wave numbers) incelenmiş ve grafikler sunulmuştur. Kullanılan boyutsuz değerler şu şekildedir.

$$\text{Boyutsuz dalga sayısı : } [h] k_n \\ \text{Boyutsuz frekans : } [2\pi h^2 (\rho A / EI_x)^{1/2}] f$$

Dalga yayını teorisi göre, sönümsüz bir yapıda oluşan, tamamen reel bir dalga sayısı çabuk sönen bir dalgayı, tamamen sanal bir dalga sayısı ise yayınan bir dalgayı tanımlamaktadır. Eğer dalga hem reel, hem de sanal kısımlara sahip ise yayınan bu dalga belli bir uzaklık sonucunda sönecektir. Sistem sönümlü olduğu takdirde her dalga hem reel, hem de sanal kısımlara sahip olmaktadır

Şekiller 3 ve 4, kütleli bağlaşmanın ele alındığı sönümsüz bir kiriş için, aynı yönde ilerleyen beş dalganın sırasıyla reel ve sanal kısımlarını göstermektedir. Görüleceği gibi dalgalardan ikisi reel, üçü sanaldır. (Çizim güçlükleri nedeni ile sıfır olan değerler 10^{-8} 'e dönüştürülmüştür). Şekil 4'te çizilen sanal dalga sayılarından en büyük değere sahip olanı burulma ağırlıklı (torsion dominated) bağlaşıklık dalgayı, diğerleri eğilme ağırlıklı (bending dominated) bağlaşıklık dalgaları belirtmektedir. Bağlaşma olmadığı varsayılırsa z yönündeki eğilme titreşimlerinin bir reel, bir de sanal; y yönündeki eğilme titreşimlerinin bir reel, bir de sanal ve burulma titreşimlerinin de bir sanal dalga sayısı vereceği bilinmektedir. Dolayısıyla umulan ve bulunan dalga sayıları arasında nitelik olarak bir fark yoktur. Değişiklikler bağlaşmadan dolayı nicelik açısından gerçekleşmiş ve dalga sayılarının log-log çizimlerde gösterdiği, bilinen, doğrusal davranış artık bulunamamıştır. Eğer sistem sönümlü olarak varsayılırsa sıfır olan dalga sayıları belli değerlere ulaşmakta, sıfır olmayanlar ise aynı değerlerini korumaktadır. Bu durum reel kısımlar ve $\eta=0.3$ için Şekil 5'te sunulmuştur. Hem kütleli hem de direngenlik bağlaşmalarının göz önünde tutulduğu durum incelendiğinde, eğilme ağırlıklı sanal dalga sayılarından daha büyük değere sahip olanında bir artış

gözlemlenmiş, bunun yanında gerek nitelik gerekse nicelik olarak belirgin bir fark görülmemiştir.

Kirişin $\eta=10^{-6}$ için bulunan üçlü bağlaşıklık rezonans değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 2 ise kirişin her üç hareket için bağlaşıklık olmayan (uncoupled) rezonans değerlerini göstermektedir.

Tablo 1: İncelenen kirişin bağlaşıklık rezonans değerleri (Hz)

(1.B: Birinci Burulma Rezonansı, 1.E-v: y yönünde birinci eğilme rezonansı, 1.E-w: z yönünde birinci eğilme rezonansı).

Yalnız Kütleli

Bağlaşma

45.49 (1.B)
69.91 (1.E -v)
101.73 (2.B)
149.82 (1.E-w)
154.85 (3.B)
207.45 (4.B)
257.29 (2.E-v)
259.86 (5.B)
312.19 (6.B)
364.47 (7.B)
416.73 (8.B)
468.96 (9.B)

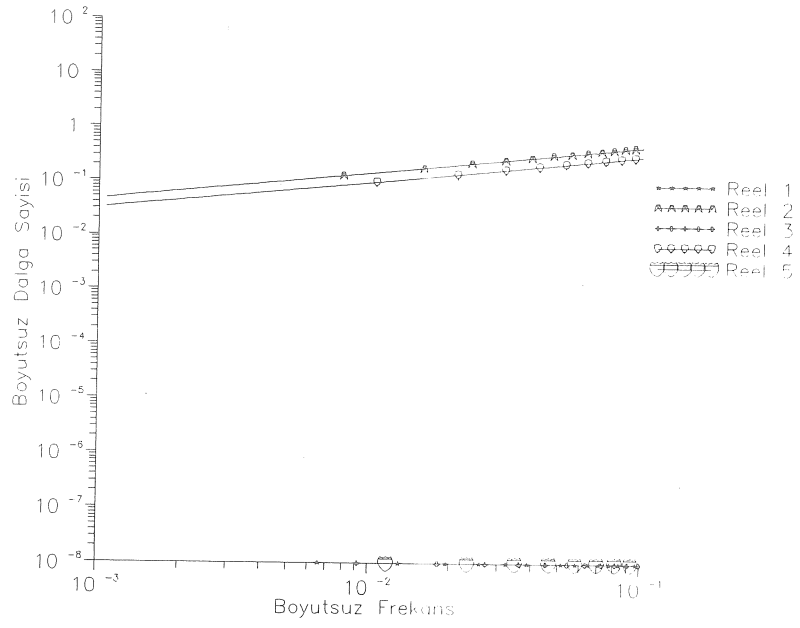
Tablo 2: İncelenen kirişin bağlaşıklık olmayan rezonans değerleri (Hz)

(B: Burulma rezonansları, E-v: y yönünde eğilme rezonansları, E-w: z yönünde eğilme rezonansları)

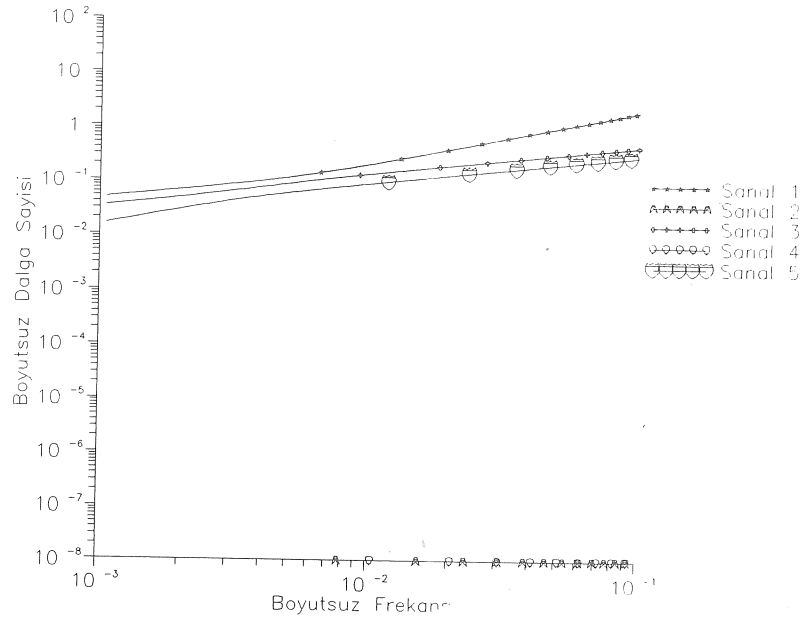
B	E-v	E-w
52.17	57.97	121.85
104.33	231.88	487.38
156.49		
208.66		
260.83		
312.99		
365.16		
417.32		
469.49		

Kirişin, sadece kütleli bağlaşmanın ele alındığı durum için elde edilen, z yönünde uygulanan bir birim kuvvete olan w tepkesi Şekil 6'da verilmiştir. Burulma ağırlıklı ve y yönündeki eğilme ağırlıklı rezonans değerlerinde, w tepkesinde ani çıkışlar (spikes) oluşmakta ancak bunlar eğrinin eğilme ağırlıklı genel karakterini bozmamaktadır. 149 Hz civarındaki eğilme rezonansı belirgindir. Burulma rezonansları, bağımsız incelendikleri durumda olduğu gibi, yaklaşık eşdeğer aralıklarla oluşmaktadır.

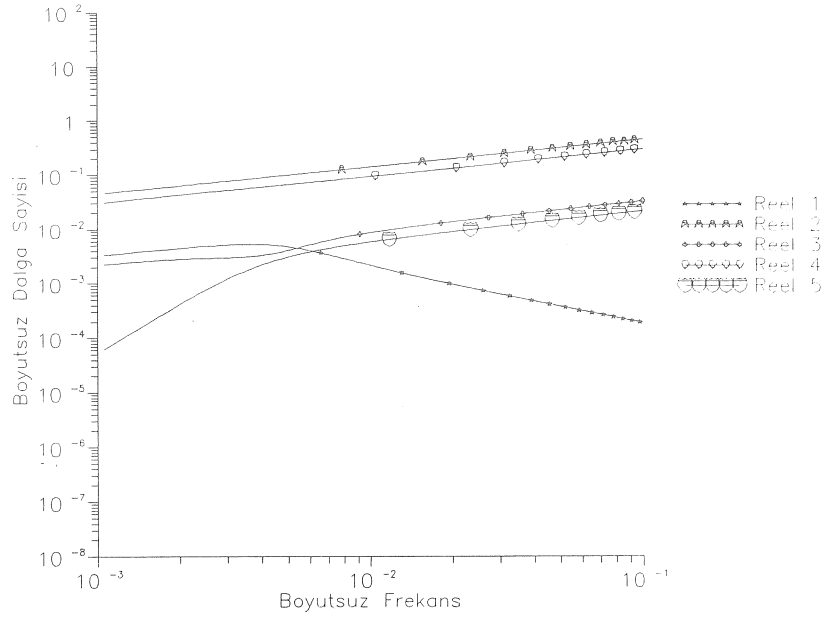
Şekil 7 kirişin kütleli bağlaşmalı durum için elde edilen, ve sadece y yönünde uygulanan bir birim kuvvete olan, v tepkesini göstermektedir. Şekil 6 ile



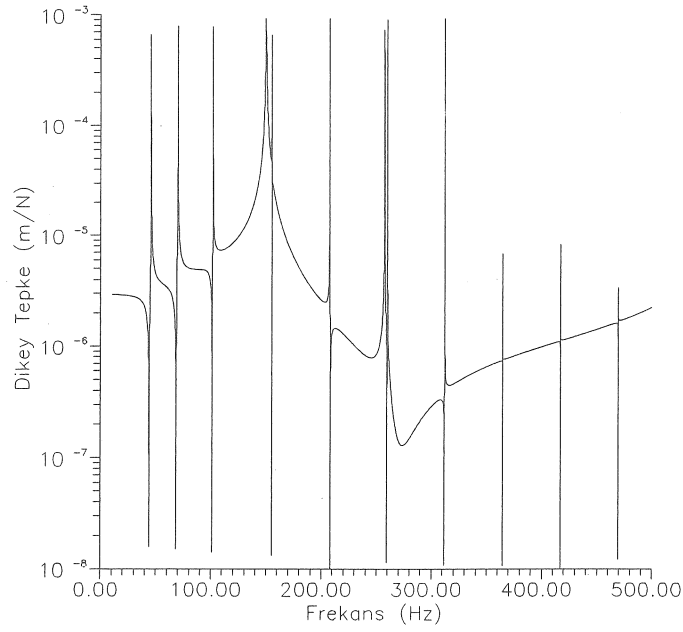
Şekil 3. Reel Dalga Sayıları ($\eta = 0$, Yalnız Kütlele Bağlaşma)



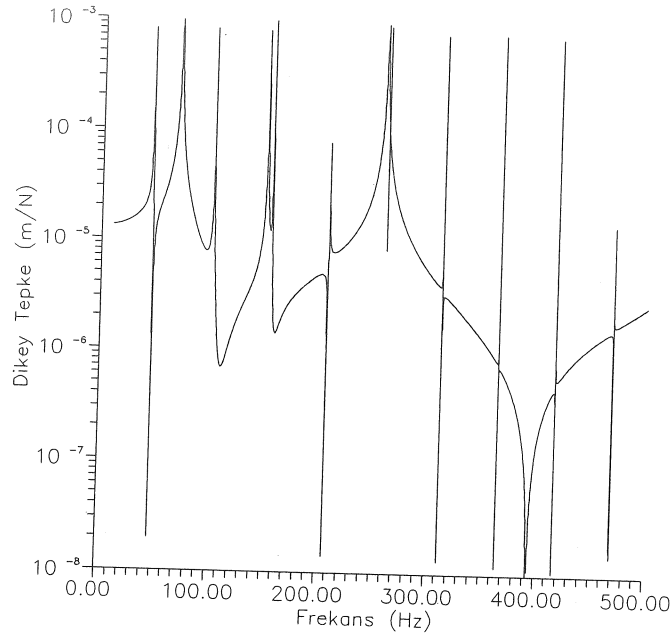
Şekil 4. Sanal Dalga Sayıları ($\eta = 0$, Yalnız Kütlele Bağlaşma)



Şekil 5. Reel Dalga Sayıları ($\eta = 0.3$, Yalnız Kütleli Bağlaşma)



Şekil 6. Dikey Tepke ($\eta = 10^{-6}$, Yalnız Kütleli Bağlaşma, w/P_2)



Şekil 7. Dikey Tepke ($\eta = 10^{-6}$, Yalnız Kütsel Bağlaşma, w/P_y)

İlgili genel gözlemler burada da geçerliliklerini korumaktadırlar.

Sadece z yönünde uygulanan bir birim kuvvet sonucunda oluşan burulma biçim şekilleri (torsional mode shapes), kütsel bağlaşmalı durum için, Şekiller 8-10'da sunulmuştur. Biçim şekilleri rezonans değerlerinde, kiriş sönümsüz varsayılarak çizilmiştir. Belirgin olan nokta; kirişin biçim şeklinin rezonansın niteliğinden çok, kaçınıcı rezonans olduğuna bağlı bulunduğuudur. Bu durum z ve y yönlerindeki eğilme biçim şekillerinde de saptanmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada, sabit kesit alanlı ve açık kesitli kirişlerin zorlanmış, bağlaşık titreşimlerini incelemekte kullanılan yeni bir analitik yöntem sunulmuştur. Kirişlerin kütle ve kayma merkezleri çakışmadığından, birbirine dik iki eksendeki eğilme titreşimleri ve burulma titreşimleri bir arada oluşmaktadır. Dalga yayılımı yaklaşımı kullanılarak geliştirilen yeni yöntem ile bağlaşık hareketin dalga sayıları bulunmuş ve zorlanmış titreşimler bu sayıların tanımladığı dalgalar yardımıyla incelenmiştir. Çalışmada kesit buruşması göz önüne alınmamış ve modelleme basit mesnetli uçlar için yapılmıştır. Zorlama noktasal harmonik kuvvet olarak düşünülmüştür.

Önerilen yöntem özellikle zorlanmış titreşimlerin frekans cevaplarının bulunması açısından yararlıdır. Zorlama bir eksen boyunca olabildiği gibi, birbirine dik iki eksen de olabilir. Birden fazla noktada uygulanabilecek olan noktasal kuvvet ve moment zorlamaları yanında dağılmış yüklerin etkileri de

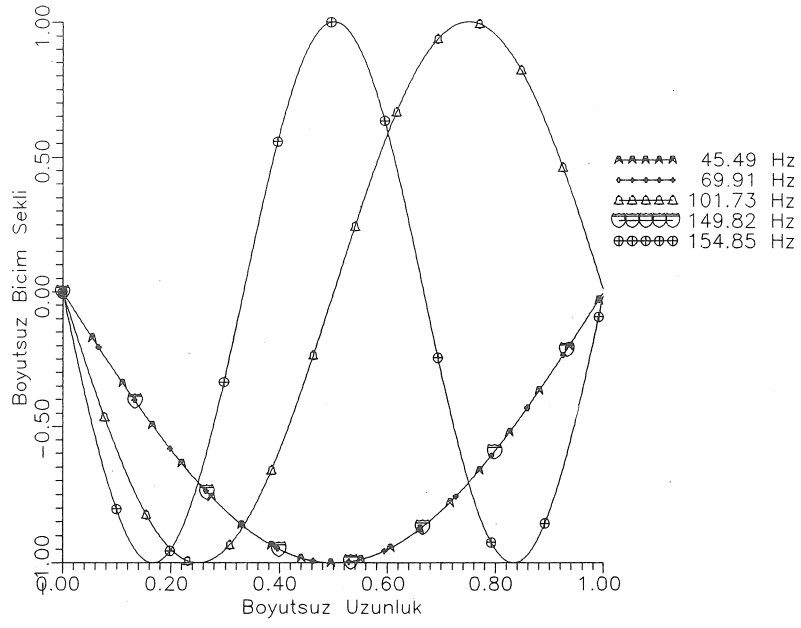
incelenebilir. Yöntem kesit buruşmasının modellenmesinde ve elastik sınır koşullarının incelenmesinde de son derece etkindir. Önerilen yöntem yardımıyla serbest titreşim özellikleri olan doğal frekanslar ve titreşim biçim şekilleri de kolaylıkla elde edilebilir.

ANALYTICAL MODELLING OF TRIPLY-COUPLED, FORCED VIBRATIONS

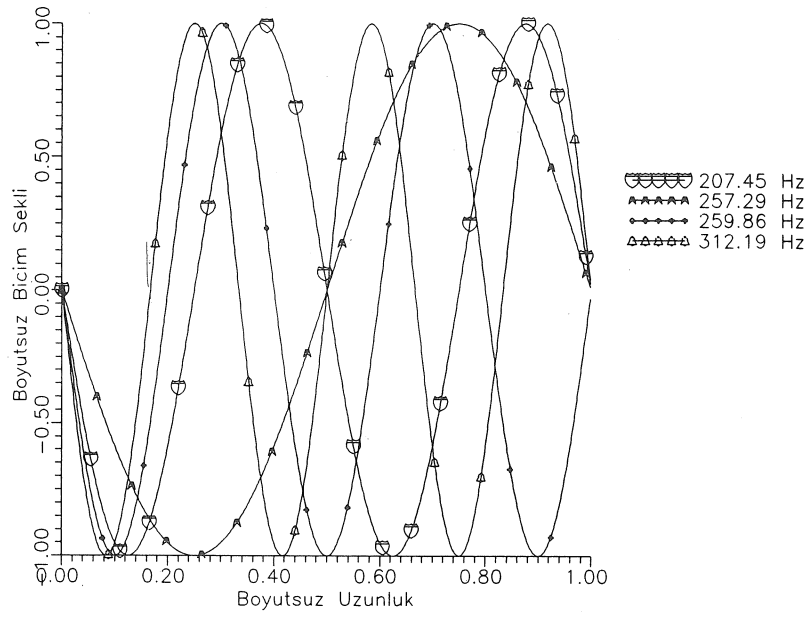
This study investigates the forced, triply-coupled vibrations of a uniform channel section. The centroid and the shear center of the cross-section do not coincide; hence the flexural vibrations in two mutually perpendicular direction and the torsional vibrations are coupled. The study uses the wave propagation approach in constructing the exact analytical model. As a pre-cursor to more elaborate analyses, the current model ignores the effects of warping and only assumes the simply-supported ends. In the analysis the excitation is taken in the form of a point harmonic force and the beam is assumed to be an Euler-Bernoulli beam.

KAYNAKÇA

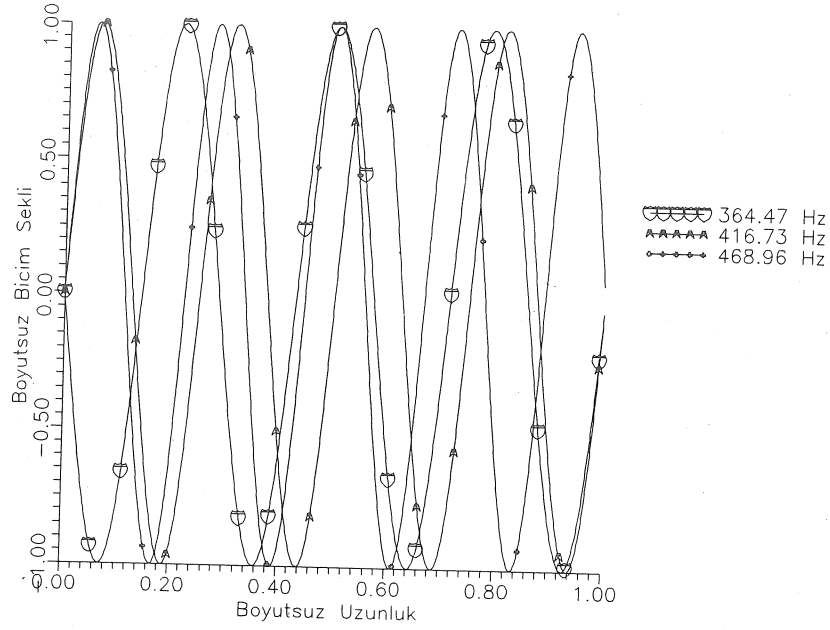
1. Gere, J.M., Torsional Vibrations of Beams of Thin-Walled Open Section, *Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME*, 76 (1954), 381-387.
2. Gere, J.M., Lin, Y.K., Coupled Vibrations of Thin-Walled Beams of Open Cross-Section, *Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME*, 80 (1958), 373-378.



Şekil 8. Burulma Biçim Şekilleri ($\eta = 0$, Yalnız Kütlesel Bağlaşma, ϕ/P_z)



Şekil 9. Burulma Biçim Şekilleri ($\eta = 0$, Yalnız Kütlesel Bağlaşma, ϕ/P_z)



Şekil 10. Burulma Biçim Şekilleri ($\eta = 0$, Yalnız Kütleli Bağlaşma, ϕ/P_z)

3. Dokumacı, E., An Exact Solution for Coupled Bending and Torsion Vibrations of Uniform Beams Having Single Cross-Sectional Symmetry, *Journal of Sound and Vibration*, 119 (1987) 3, 443-449.
4. Mead, D.J., A New Method of Analyzing Wave Propagation in Periodic Structures; Applications to Periodic Timoshenko Beams and Stiffened Plates, *Journal of Sound and Vibration*, 104 (1986) 1, 9-27.
5. Yaman, Y., Wave Receptance Analysis of Vibrating Beams and Stiffened Plates, *Doktora Tezi*, University of Southampton, 1989.
6. Mead, D.J., Yaman, Y., The Harmonic Response of Uniform Beams on Multiple Linear Supports: A Flexural Wave Analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 141 (1990) 3, 465-484.
7. Mead, D.J., Yaman, Y., The Harmonic Response of Rectangular Sandwich Plates with Multiple Stiffening: A Flexural Wave Analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 145 (1991) 3, 409-428.
8. Yaman, Y., Eksene Dik Titreşimler ile Burulma Titreşimlerinin Birarada Oluştığı Kirişlerde Zorlanmış Titreşimlerin Analitik Modellenmesi, 8. *Ulusal Mekanik Kongresi Bildiri Kitabı*, 629-638, Antalya, 1993.
9. Yaman, Y., Kirişlerde Birlikte Var Olan Eğilme-Burulma Titreşimlerinin Analizi, 6. *Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 421-430, KTÜ, 1993.

Mustafa İ. Gökler
Doçent

Cüneyt Özbal
Araştırma Görevlisi

Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

Yüzey Modellemede Kesişen Yüzeylerin Kesişme Eğrisi Boyunca Kenar Geçiş Yüzeylerinin Oluşturulması

Bu çalışmada, bilgisayar destekli tasarım ve imalat uygulamalarında kullanılmak üzere, yüzeylerin kesişme eğrisi boyunca geçiş yüzeylerinin oluşturulması için, sabit çaplı küreyle yuvarlatma metodunu kullanan bir kaynaştırma tekniği kullanılmıştır. Bu tekniği kullanarak silindir, koni, torus, küre ve blok gibi iki temel cismin yüzeyleri arasında geçiş yüzeyleri oluşturulabilir. Çalışmada kullanılan modül algoritmaları daha önce iş istasyonu üzerinde geliştirilmiş olan katı modelleme programına eklenmiştir.

GİRİŞ

Bilgisayar destekli geometrik tasarımda, temel yüzeyler arasında düzgün geçiş yüzeyleri oluşturma işi yüzey kaynaştırması olarak tanımlanmaktadır. Yüzey kaynaştırmasındaki esas amaç, temel yüzeylerin kesişmesiyle oluşan keskin kenarları (köşeleri) yuvarlatmaktır. Yüzey kaynaştırma estetik ya da bazı tasarım nedenleriyle bir zorunluluk olabilir. Bir parçadaki keskin kenarların düzgünleştirilmesi, o parçanın mukavemetini, güvenilirliğini, görünüşünü ya da işlenilebilirliğini geliştirme yönünde kullanılabilir. Bir şarap şişesinde alt gövdeyle üst gövde arasındaki düzgün geçiş bir estetik gereksinim olarak görülebilir. Bir başka tarafta ise, uçağın gövde ve kanatları arasındaki düzgün geçiş ise gerilme yığılması düşürme açısından tasarım gerekliliğidir.

Literatürde birçok kaynaştırma tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler, kaynaştırılacak temel yüzeylerin açık ve kapalı olarak tanımlı [1, 2, 3] ya da parametrik olarak tanımlı [4, 5] olmasına göre değişmektedir. Bu çalışmada ise diğer tekniklere göre bazı avantajları gözönünde bulundurarak sabit çaplı kaynaştırma [6] tekniği kullanılmıştır. Sabit çaplı kaynaştırmayla oluşturulan geçiş yüzeyleri, gözönünde canlandırma ve anlama açısından diğer tekniklerdekine göre daha basit durumdadırlar. ODTÜ BİLTİR Merkezi'nde daha önce geliştirilmiş katı modelleme programına [7-10] bu teknik için yazılan modül algoritmaları eklenmiştir [11].

SABİT ÇAPLI KÜREYLE KAYNAŞTIRMA TEKNIĞİ

Bu teknikte, geçiş yüzeyleri Şekil 1'de görüldüğü gibi prensipte iki temel yüzey arasında sabit çaplı bir küre yuvarlayarak oluşturulmaktadır.

Sabit çaplı küreyle kaynaştırma tekniğinde izlenen yol aşağıdaki gibi özetlenebilir:

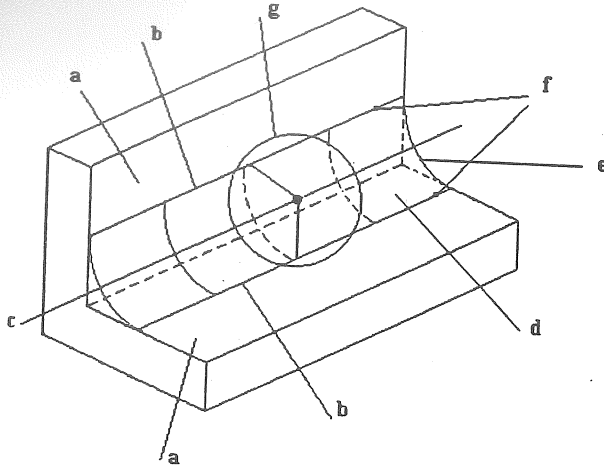
1. Kaynaştırılacak temel yüzeyler (silindir, koni vb.) parametrik olarak tanımlanır.
2. Tanımlanan temel yüzeylerin öteleme yüzeyleri parametrik olarak tanımlanır.
3. Bulunan öteleme yüzeylerin kesişme eğrileri uygun bir kesişme algoritması kullanılarak bulunur. Bulunan kesişme eğrisi yuvarlanacak kürenin merkezinin izleyeceği yolu temsil eder.
4. Son olarak geçiş yüzeyleri oluşturulur.

Temel Yüzeylerin Parametrik Olarak Tanımlanması

Parametrik yüzeyler bilindiği gibi x, y, z kartezyen koordinat sistemindeki noktaların tu-düzlemindeki t ve u parametrelerinin belirlenmesiyle bulunur:

$$r(t, u) = x(t, u) i + y(t, u) j + z(t, u) k \quad (1)$$

Silindir kenar yüzeylerindeki herhangi bir nokta aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir:



Şekil 1. Sabit Çaplı Kaynaştırma. a) Temel Yüzey, b) Temas Eğrisi, c) Patika Eğrisi, d) Geçiş Yüzeyi, e) Geçiş Eğrisi, f) Temas Noktası, g) Yuvarlatılan Küre.

$$P(t, u) = [xc + R \cos t] i + [yc + R \sin t] j + [zc + u] k \quad (2)$$

$$0 \leq t \leq 2\pi \quad \text{ve} \quad z_{alt} \leq u \leq z_{üst}$$

R silindir çapını, xc, yc ve zc alt taban yüzeyinin koordinatlarını temsil eder. Diğer temel yüzeyler de benzer bir şekilde tanımlanabilir [11].

Öteleme Yüzeylerinin Oluşturulması

Öteleme yüzeyleri, temel yüzeylerin genişlemiş ya da daralmış uyarlamasıdır. d mesafesi kadar genişleyen bir öteleme yüzeyini oluşturmak için temel yüzeydeki her noktaya d uzaklığı eklenir. Daralmış bir öteleme yüzeyi elde etmek için benzer bir şekilde d uzaklığı çıkarılır [12].

Öteleme yüzeyi parametrik olarak aşağıdaki formülle tanımlanır:

$$O(t, u) = P(t, u) + d n(t, u) \quad (3)$$

Bu eşitlikte d öteleme mesafesi, n(t, u) ise birim yüzey normalidir ve aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$n(t, u) = \frac{P_t \times P_u}{|P_t \times P_u|} \quad (4)$$

bu formülde

$$P_t = \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{ve} \quad P_u = \frac{\partial P}{\partial u}$$

t ve u parametrelerine göre temel yüzeye teğet yönleri göstermektedir.

Ötelenmiş Yüzeylerinin Kesişimi

Ötelenmiş yüzeylerin kesişim problemini çözmek için Barnhill [13] tarafından önerilmiş bir algoritma kullanılmıştır. Bu kesişim algoritması aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Adım 1: Kaynaştırılacak temel yüzeylerin ötelenmiş yüzeyleri dikdörtgenel parametrik parçalara ayrılır. Böylece her dikdörtgenel parçanın köşe koordinatları yanında köşe parametrik değerleri de bellekte tutulur.

Adım 2: Birinci yüzeyin dikdörtgenel parçaları diğer yüzeyin dikdörtgenel parçalarıyla kesiştirilir. Böylece 'başlangıç kesişme noktaları' (B.K.N.) bulunur.

Adım 3: Bu adımda, bir önceki adımda bulunan B.K.N.'ları esas alınarak gerçek eğri-yüzey kesişme noktaları, G.E.K.N., bulunmaya çalışılır. Bunun için Newton Raphson Tekrarlama tekniği [6] kullanılmıştır. Kesişen bir kenar iso-parametrik bir eğri sayılabilir ve iki yüzeyin G.E.K.N.'sı bulunması için aşağıdaki eşitlik sağlanmalıdır:

$$F^0(r^*, s) - G^0(t, u) = 0 \quad (5)$$

Bu eşitlikte $F^0(r^*, s)$, $r = r^*$ sabit değeriyle iso-parametrik kenara sahip olan birinci ötelenmiş yüzeyi, $G^0(t, u)$ ise G.E.K.N.'sının dikdörtgenel parametrik parça üzerinde olan ikinci ötelenmiş yüzeyi temsil etmektedir.

Kullanılan tekrarlar tekniğiyle iki yüzeyin üzerindeki bütün G.E.K.N.'ları bulunur ve bilgisayar belleğinde tekli-sıralı-liste olarak oluşturulur [11].

Adım 4: Bir önceki adımda iki ötelenmiş yüzeyi de sağlayan G.E.K.N.'ları bulunmuştu. Ancak bu noktalar bellekte dağınık durumda bulunmaktadırlar ve kürenin kaynak yüzeyi oluşturmak için üzerinde yuvarlanması gereken patika eğrisini oluşturabilecek sırada değildirler. Bu dağınık noktaları sıralamak bir çözüm gibi gözükse de daha güçlü bir yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemdeki esas amaç, bellekteki herhangi bir G.E.K.N.'sından başlayarak kesişim eğrisi boyunca belli adım mesafesiyle ilerlemek ve yeni gerçek yüzey-yüzey kesişim noktaları, G.Y.K.N., bulmaktır. Bir G.Y.K.N.'sı aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir:

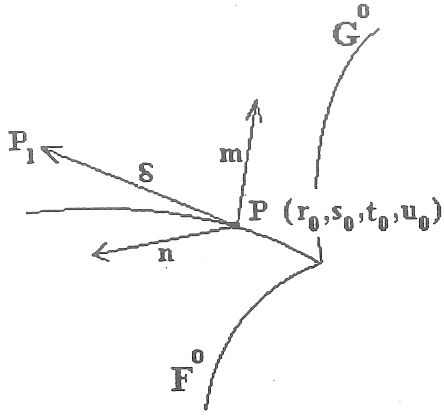
$$F^0(r, s) - G^0(t, u) = 0 \quad (6)$$

Bu G.Y.K.N.'sı bir P_1 tahmin noktası bulunarak elde edilebilir. Bu tahmin noktası iki öteleme yüzeyinin normallerinin vektörel çarpımlarıyla bulunabilir;

$$P_1 = F^0(r_0, s_0) \pm \frac{\delta (m \times n)}{|m \times n|} \quad \text{veya}$$

$$P_1 = G^0(t_0, u_0) \pm \frac{\delta (m \times n)}{|m \times n|} \quad (7)$$

Şekil 2'de gösterildiği gibi (7) eşitliğinde, δ adım mesafesi olup program tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. \pm değeri ise patika izleme yönünü (ileri veya geri) temsil eder.



Şekil 2. Birim Normallerin Vektörel Çarpımıyla Bulunan P₁ Tahmin Noktası.

Daha sonra P₁ tahmin noktasına denk gelen her iki öteleme yüzeyinin \bar{r} , \bar{s} , \bar{t} ve \bar{u} parametrik değerleri bulunur. Bu parametrik değerlere denk gelen $B = F^0(\bar{r}, \bar{s})$ ve $D = G^0(\bar{t}, \bar{u})$ yüzey noktaları aynı noktalar değildir ve ortalama değer teoremi kullanılarak bu noktalar birbirlerine yaklaştırılarak G.Y.K.N'ları hesaplanır [11]. (7) eşitliğiyle yeni tahmin noktaları hesaplanır ve yeni G.Y.K.N'sı bulunur. Bu ilerlemeler sırasında geometrik olarak iki G.Y.K.N'sı arasında bulunan G.E.K.N'ları bilgisayar belleğinden silinir. Bellekte hiçbir G.E.K.N'sı kalmayana dek yukarıdaki işlemler tekrarlanır ve bütün kesişme eğrileri bulunur. Bu sırada kesişme eğrilerini oluşturan bütün G.Y.K.N'ları tekli-sıralı liste olarak belleğe yazılır.

Geçiş Yüzeyinin Yaratılması

Kaynaşma yüzeyi, bulunan kesişme eğrileri boyunca yaratılır. Bulunan her G.Y.K.N'sının birinci temel yüzeydeki r, s ve ikinci temel yüzeydeki t, u parametrik değerleri bilinmektedir. Böylece birinci ve ikinci temel yüzeyindeki $C_0 = F(r, s)$ ve $C_2 = G(t, u)$ noktaları bulunmaktadır. Bu noktalarda temel yüzeylere teğet olan iki düzlemin kesişim orta noktası olan C₁ noktası aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir [6].

$$C_1 = \frac{1}{2} [C_0 + C_2] + \frac{1}{2} \frac{1}{(m.n)^2 - 1} [(\nabla C.n)((m.n)m-n) - (\nabla C.m)((m.n)n-m)] \quad (8)$$

Burada $\nabla C = C_2 - C_0$ ve m ile n ise de C₀ ve C₂ noktalarındaki birim normalleridir.

Hesaplanan bu üç C₀, C₁ ve C₂ noktasından B-Spline eğrisi ile bir dairesel ark oluşturmak mümkündür ve bulunan bu kaynaştırma eğrisi aşağıda şöyle gösterilmiştir:

$$P(t) = \frac{(1-t)^2 C_0 + 2h_2 t(1-t) C_1 + t^2 C_2}{(1-t)^2 + 2h_2 t(1-t) + t^2} \quad 0 < t < 1 \quad (9)$$

$h_2 = \cos \theta$ olarak tanımlıdır.

Bu eşitlikler her G.Y.K.N'sı için yazılır ve herbiri için bir kaynaştırma eğrisi tanımlanır. Her kaynaştırma eğrisi istenilen sayıdaki köşe noktalarıyla temsil edilir ve komşu kaynaştırma köşe noktalarıyla bir geçiş yüzeyi oluşturacak biçimde birleştirilir.

Şekil 3-8'de, çalışmada gerçekleştirilen bazı geçiş (kaynaşma) yüzeylerine örnekler verilmiştir.

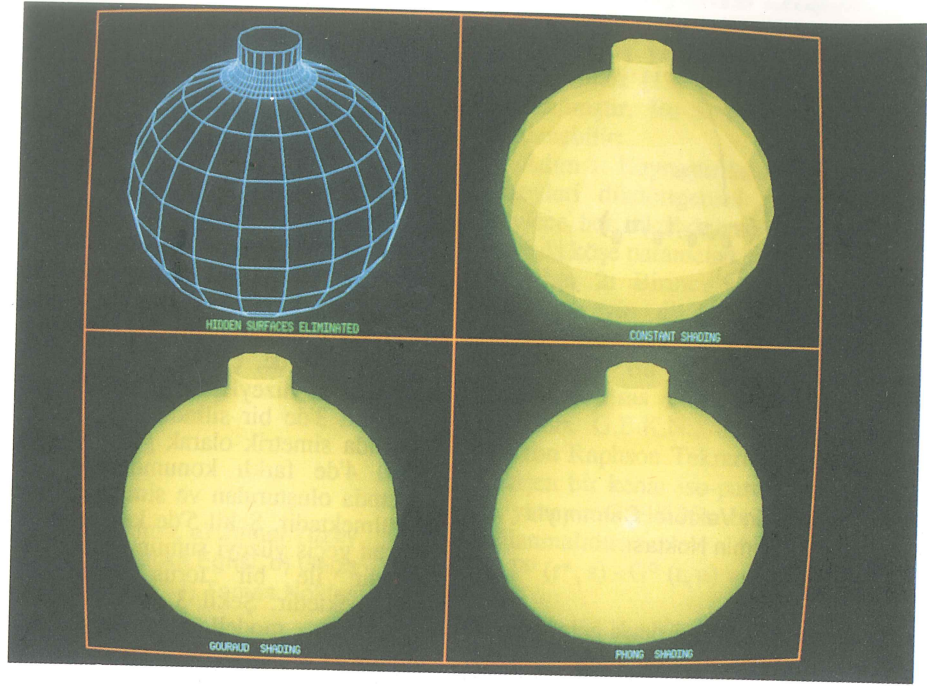
Şekil 3'de bir silindir ile bir küre temel eleman arasında simetrik olarak geçiş yüzeyi oluşturulmuştur. Şekil 4'de farklı konumlardaki iki silindir eleman arasında oluşturulan ve simetrik olmayan geçiş yüzeyi görülmektedir. Şekil 5'de kesişmeyen iki küre arasında oluşan geçiş yüzeyi sunulmuştur. Şekil 6'da kesişen bir silindir ile bir torus arasındaki geçiş yüzeyi görülmektedir. Şekil 3 - 6'da daha önce geliştirilmiş olan katı modelleme programının [7-10], ilgili modülleri kullanılarak görünmeyen yüzeylerin elimine edilmesi ve üç değişik yöntemle (Sabit, Gourand ve Phong) [9] tonlanmış ve gölgelendirilmiş görüntüler sağlanmıştır. Şekil 7'de kesişen bir silindir ile koni arasında oluşan iki geçiş yüzeyi görülürken, Şekil 8'de de bir silindir ile koni arasında geçiş yüzeyi sunulmuştur. Şekil 7 ve 8'de görünmeyen yüzeyler elimine edilmeden tel kafes görüntüler verilmiştir. Şekil 1-7'de geçiş yüzeyi kapalıyken Şekil 8'de ise açık geçiş yüzeyi görülmektedir.

SONUÇ

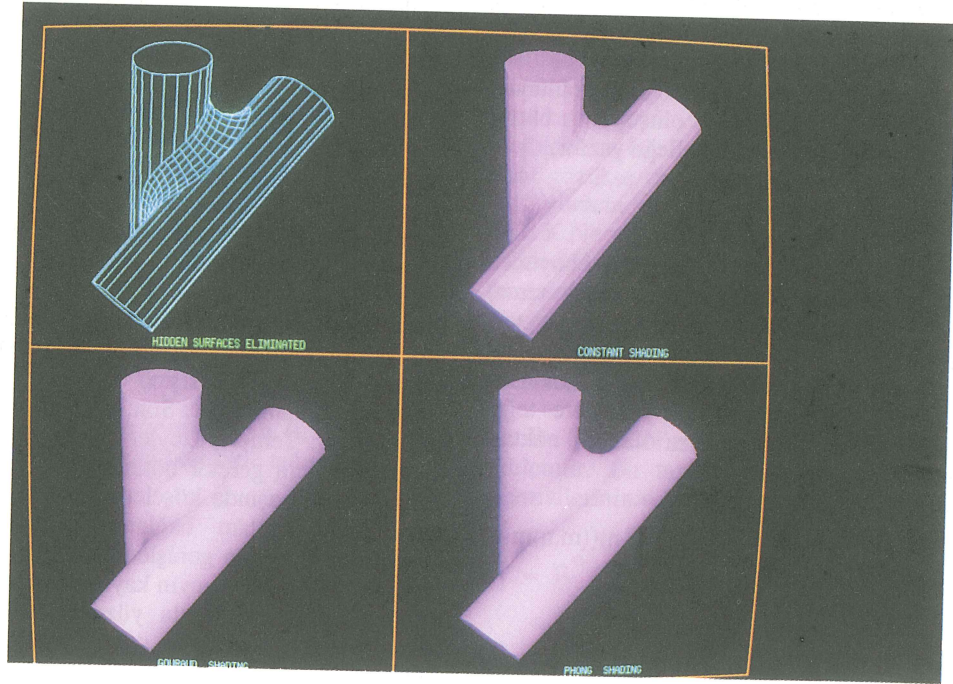
Bu çalışmada iki temel mühendislik yüzeyinin kenar kaynaşmasını sağlamak için sabit çaplı küreyle kenar kaynaştırma tekniği kullanılmıştır. Çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, temel yüzeylerin parametrik olarak tanımlanması sağlanmıştır. İkinci bölüm bu temel yüzeylerin parametrik ötelenmiş yüzeylerini bulmaya yöneliktir. Üçüncü bölümde iki parametrik yüzeyin kesişme eğrilerini bulmak için bir algoritma kullanılmıştır. Son bölümde ise geçiş yüzeyi yaratılmıştır. Temel yüzeyler ve geçiş yüzeyleri yüzey modelleme için gerekli bütün bilgileri taşımaktadırlar. Bu bilgilerin başında köşelerin, kenarların ve yüzlerin birbirleriyle sağlam bağlantı bilgileri gelmektedir. Geliştirilen program genişletilebilir bir yapıya sahiptir. Program iki temel yüzeyin kaynaşmasını sağlayabilecek niteliktedir. Birden fazla yüzeyin kaynaştırılabilmesi ilerde kullanılacak daha karışık yöntemlerle sağlanabilir.

TEŞEKKÜR

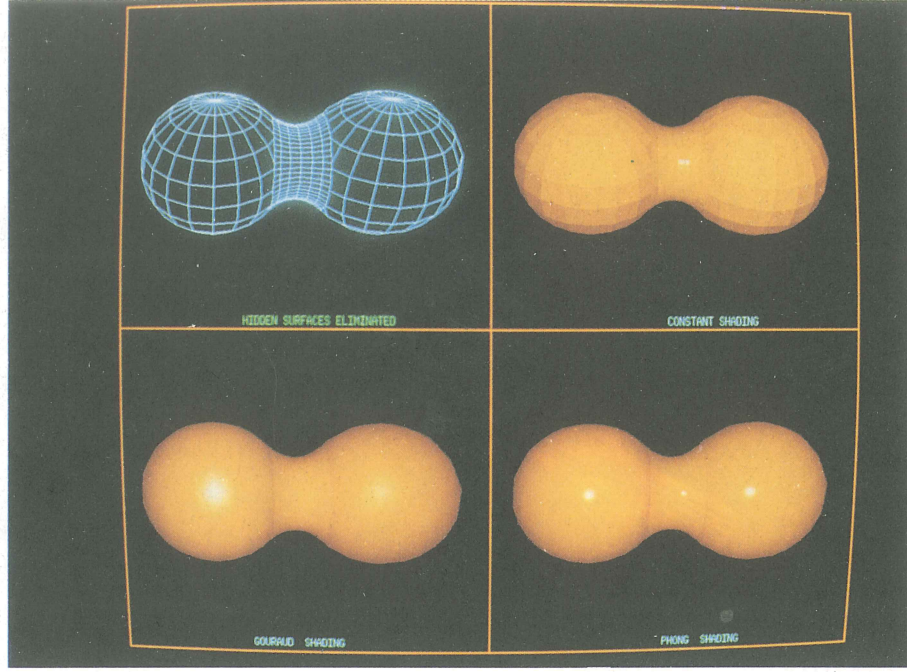
Yazarlar, çalışma sırasında yazılım ve donanım desteğini veren ODTÜ-BİLTİR Merkezine teşekkür eder.



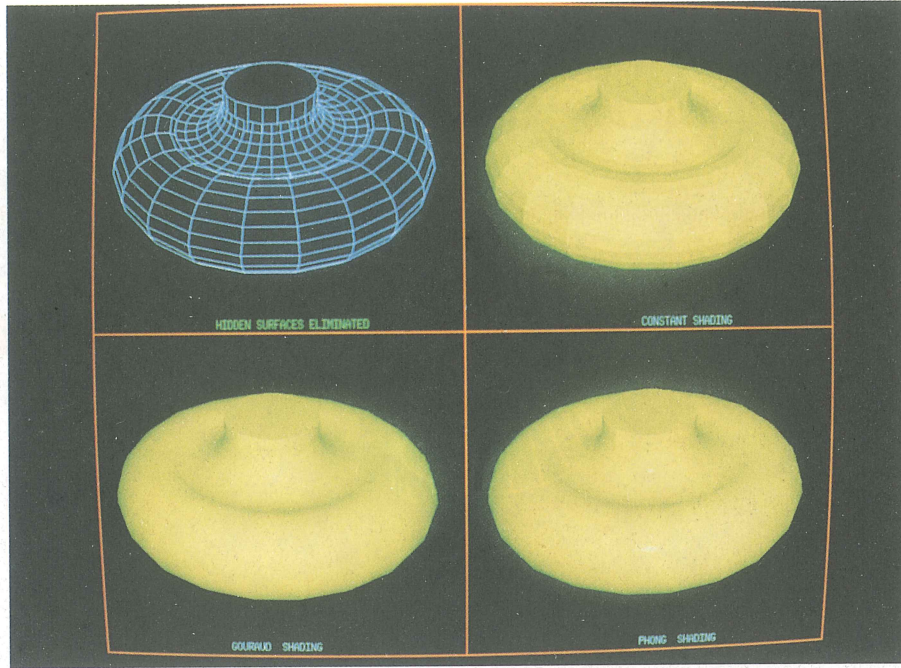
Şekil 3. Bir Silindir ve Bir Küre Arasında Geçiş Yüzeyi Oluşturma.



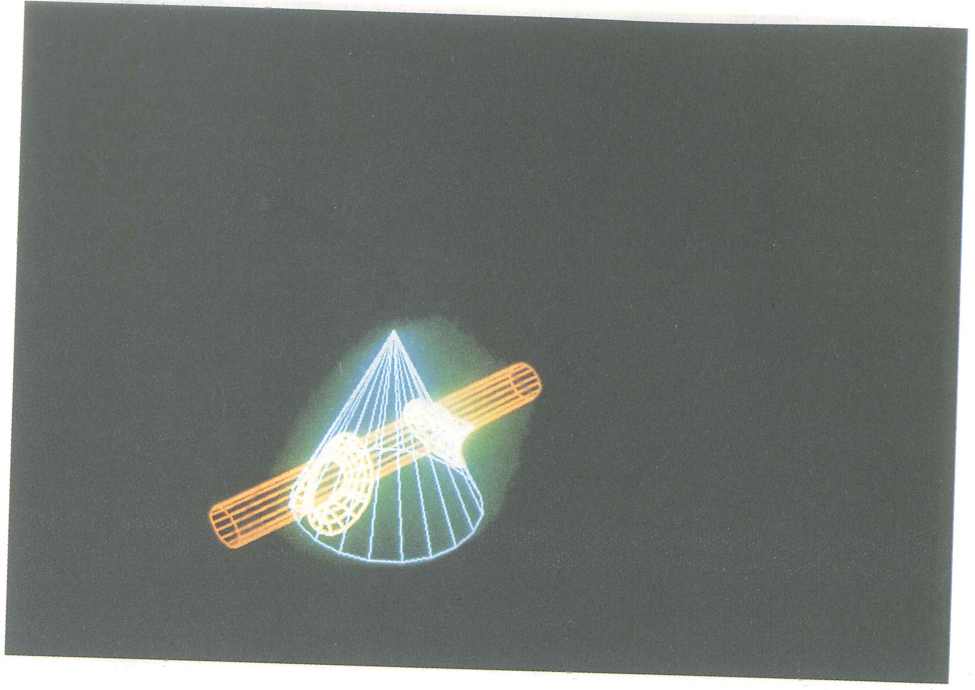
Şekil 4. İki Silindir Arasında Geçiş Yüzeyi Oluşturma.



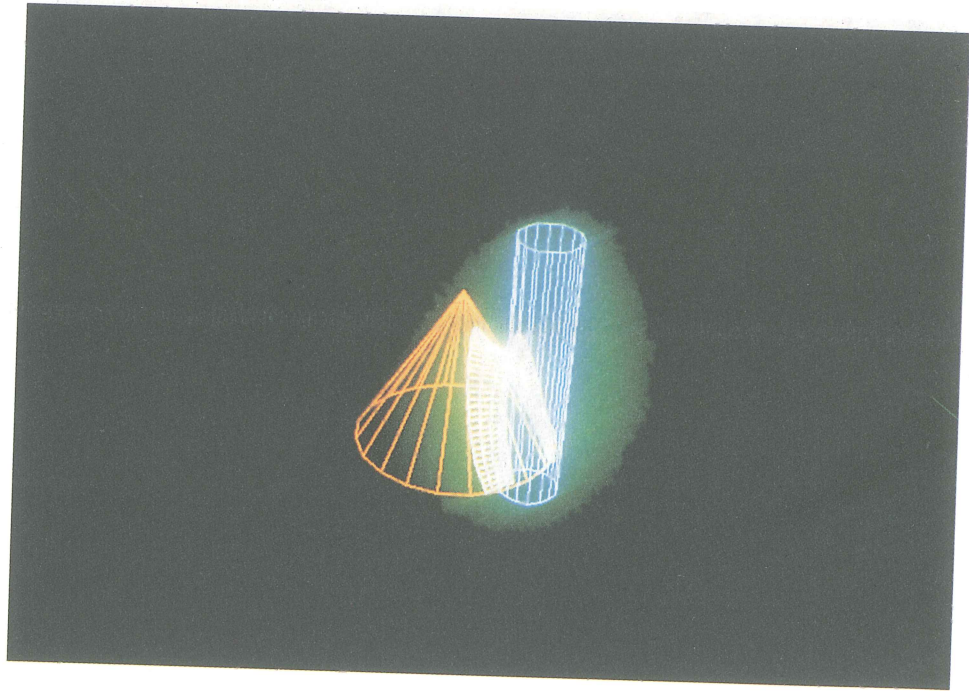
Şekil 5. Kesişmeyen İki Küre Arasında Geçiş Yüzeyi Oluşturma.



Şekil 6. Bir Silindir ve Bir Torus Arasında Geçiş Yüzeyi Oluşturma.



Şekil 7. Kesişen Bir Koni ile Silindir Arasında İki Geçiş Yüzeyi Oluşturma.



Şekil 8. Bir Silindir ile Koni Arasında Açık Geçiş Yüzeyi Oluşturma.

BLENDING IN SURFACE MODELLING

In this study, an edge blending technique using the constant radius ball blending method, is implemented to connect surfaces smoothly to be used in modelling for Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing applications. By using this technique, two parametrically defined surfaces can be blended by inspecting the intersection curves of the offsets of these surfaces.

KAYNAKÇA

1. Li, J., Hoschek, J. and Hartmann, E., Gn-1 - Functional Splines for Interpolation and Approximation of Curves, *Surfaces and Solids, Computer Aided Geometric Design*, 7 (1990), 209-220.
2. Hartmann, E., Blending of Implicit Surfaces with Functional Splines, *Computer Aided Design*, 22 (Oct. 1990) 8, 500-506.
3. Hoffmann, C. and Hopcraft, J., Quadratic Blending Surfaces, *Computer Aided Design*, 18 (July/August 1986) 6, 301-306.
4. Rossignac, J.R. and Requicha A.A.G., Constant Radius Blending in Solid Modelling, *Computers in Mechanical Engineering*, July (1987), 171-189.
5. Klass, R. and Kuhn, B., Fillet and Surface Intersections Defined by Rolling Balls, *Computer Aided Geometric Design*, 9 (1992), 185-193.
6. Choi, B.K. and Ju, S.Y., Constant Radius Blending in Surface Modelling, *Computer Aided Design*, 19 (May 1989) 4, 213-220.
7. Mumcuoğlu, A., Algorithms for Regularized Set Operations on Solid Objects, *Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü*, 1990.
8. Çanga, M., Union, Intersection and Difference in Solid Modelling Applications, *Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü*, 1990.
9. Ünal, A., Hidden-Surface Elimination and Shading Techniques in Solid Modelling, *Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü*, 1991.
10. Özçelik, C., Sweep-based Primitive Creation in Solid Modelling, *Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü*, 1991.
11. Özbal, C., Blending in Surface Modelling, *Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü*, 1995.
12. Rossignac, J.R. and Requicha, A.G., Offsetting Operations in Solid Modelling, *Computer Aided Geometric Design*, 3 (1986), 129-148.
13. Barnhill, R.E., Farin, G., Jordan, M. and Piper, B.R., Surface/Surface Intersections, *Computer Aided Geometric Design*, 4 (1987), 3-16.

Scara Tipi Endüstriyel Robot Hareketlerinin Bilgisayar Destekli Programlarla Kontrolü

Necdet Geren
Yardımcı Doçent

Mustafa Ertürk
Araştırma Görevlisi

Makina Mühendisliği Bölümü
Çukurova Üniversitesi
Balçalı, ADANA

Bu çalışmada bilgisayar destekli tasarım sisteminde çizilen iki boyutlu yörüngeler robot verilerine dönüştürülerek noktadan noktaya koordinasyonsuz hareket yapan SCARA tipi Serpent Montaj Robotuna yörünge izleme özelliği kazandırılmıştır. Bu amaçla, AUTOCAD R.12 programında planlanan yörüngelerin izlenmesi için robotun kontrol programlama dili olan WALLI 2.5'u destekleyen TURBO PASCAL 6.0'da hazırlanan yardımcı yazılımlar geliştirilmiştir. Robotun programlama dili olan WALLI 2.5 ile beraber çalışan bu yardımcı programlar daha karmaşık işlerin çok sayıda verisinin hızlı bir şekilde oluşturulmasını ve robota transferini amaçlamaktadır. Sonuç olarak yapılan çalışma ile yörünge izleme özelliği olmayan Serpent robotu planlanan yörüngeleri kontrol çözümlülüğü ve tekrar edebilirliği elverdiği ölçüde izleyebilecek ve WALLI 2.5 ile yapılan al ve yerleştir (pick and place) işlerinden daha karmaşık olan nokta kaynağı, lazer ve su jeti ile kesme gibi uygulamaları yapabilecek düzeye getirilmiştir.

GİRİŞ

Geliştirilen robotlarla birlikte üretici firmalar değişik özelliklerde robot programlama teknikleri de geliştirmekte ve değişik yazılımlar ortaya çıkartmaktadır. Robot programlama dilleri robotların kullanıma amacına, yapabileceği işlerin karmaşıklığına, bu işlerin çeşidine ve üretici firmaya bağlı olarak değişik özellikler göstermektedir. Ancak iyi bir robot yazılımının; kullanım kolaylığı, kullanıcının lisanında ya da geçerli bir lisanda kullanıma cevap vermesi, geliştirmeye uygun olması, kullanıcının özel koordinatları girmesine gerek kalmadan gideceği noktayı robota tanıtabilmesi, başka programlarla veri alış verişinde bulunabilmesi ve diğer sistemlerle iletişim kurabilmesi gibi özellikleri olmalıdır.

"SCARA" kelimesinin İngilizce açılımı "Selectively Compliant Articulated Robot Arm"dır, bu ise, dilimize "Seçici serbest esnemeli robot kolu" şeklinde çevrilebilir. Becker ve Gay [3] yaptıkları çalışmada SCARA tipi robotların genel özellikleri ile birlikte Serpent robot teknolojisini açıklamışlardır. Serpent robotlarda kullanılan servo kontrollü motorlar sürekli en yüksek hızda çalışmakta ve robota koordinesiz hareket yaptırılmaktadır. Robotun programlama dili WALLI 2.5 tarafından motor hızları kontrol edilememektedir.

Serpent robotu al ve yerleştir işlerinde oldukça başarılıdır ve programlama dili WALLI 2.5 bu amaca yöneliktir.

Robotlar yazılımlarının geliştirilmesi ile başka amaçlar içinde kullanılabilir. Şişman [9], sunduğu çalışmada FANUC ARC Mate Sr ark kaynak robotunu, istifleme robotu olarak kullanmak üzere bir yazılım geliştirmiştir. Çalışmanın sonuçlarından biri olarak, başka amaçlı bir endüstriyel robotun sunulan yazılım sayesinde istifleme robotu olarak da kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Bugüne kadar bilgisayar destekli tasarım (CAD) sistemlerinin bilgisayar destekli üretim (CAM) sistemleri ile entegrasyonunu konu alan birçok çalışma yapılmıştır. Yu ve ark. [10] tarafından yapılan çalışmada serbest formlu yüzey verileri CAD sisteminde tanımlanan kesici yolu NC kodlarına çevrilmektedir. Arslan [2] tarafından yapılan çalışmada ise siyah/beyaz CCD kamera ve görüntüleme kartı kullanılarak yakalanan makina elemanlarının iki boyutlu resmi, DXF dosya formatına, C++ dilinde yazılan bir programla dönüştürülerek, bilgisayar grafik yazılım paketlerinde görüntülenebilir bir teknik resim olarak elde edilmektedir. Ünver [8]'in çalışmasında AutoCAD R10 programında iki boyutlu çizimleri DXF formatına dönüştürerek parça programı optimizasyonu

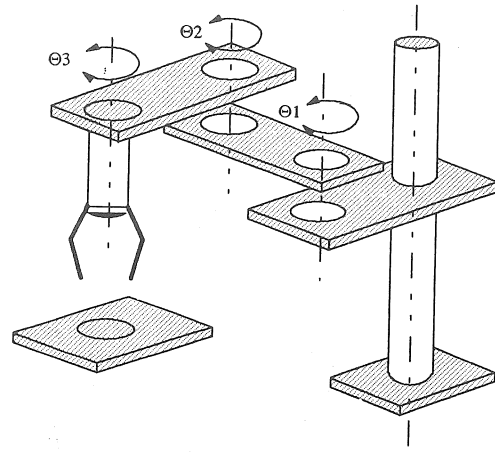
konulu çalışmasında kullanmıştır. Arslan [2], yaptığı çalışmada CNC programı için gerekli olan verileri AutoCAD çizim programından çekerek imalatta kullanılacak olan CNC tezgahına uygun parça programı komutları oluşturan bir yazılım geliştirmiştir.

Yapılan bu çalışmada AutoCAD R.12 programında doğru, daire ve yay kullanarak oluşturulan iki boyutlu çizimler DXF formatına dönüştürülmektedir. DXF formatlı dosyalar Turbo Pascal 6.0 dilinde geliştirilen yazılımla okutularak yörüngeyi oluşturan çizim öğeleri robot veri dosyalarının oluşturulması için kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, bilgisayar destekli tasarım sisteminde elde edilen yörüngelerin robot verilerine dönüştürülerek Serpent robot tarafından izlenmesinin sağlanmasıdır. Bu kapsamda hedeflenen amaca uygun olmayan, robota sadece al ve yerleştir işlerini yaptırabilen WALLI 2.5 programlama dilini destekleyen yazılımların geliştirilmesi gerekmektedir. WALLI 2.5 programlama dilinin yapılmak istenen iş için tek başına yetersizliğinin başlıca nedeni bilgisayar destekli tasarım sistemlerinden veri okuyabilecek düzeyde olmaması ve robot pozisyonunun kartezyen koordinat sisteminde tanımlanmamasıdır. Ayrıca WALLI 2.5 programlama dili gidilecek her pozisyonu robota tek tek tanıtılmasını gerektirmektedir. Oysa yörünge izleme uygulamalarında robota pozisyonların tek tek tanıtımı değil birbirine yakın bir çok noktadan oluşan yörünge hesaplaması yoluyla elde edilmesi esastır. Bu gereksinim kapsamında geliştirilen programlar AutoCAD dosyalarının okunması, okunan yörünge ara noktalarının kartezyen koordinat sisteminde enterepolle edilerek hesaplanması, hesaplar sonucu bulunan robot kol açılarının robot verilerine dönüştürülmesi ve bu verilerin WALLI 2.5 ortamına transferi aşamalarını içermektedir. Yapılan yörünge izleme uygulamaları ile sunulan yaklaşımın geçerliliği gösterilmiştir. Bu çalışma esas olarak AutoCAD yazılımında çizilen değişik geometriler için veri dosyaları oluşturularak robot programlama zamanını azaltmak ve sistem esnekliğini arttırmak amacıyla hazırlanmıştır. Böylece lazer ya da su jeti ile kesme gibi çeşitli amaçlar için AutoCAD'de çizilen iki boyutlu çizimler robot programlama dili WALLI 2.5'a dönüştürülerek koordinatsız hareket yeteneğine sahip olan Serpent robota yörünge izleme özelliği kazandırılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada Scara tipi Serpent I robotu kullanılmıştır (Şekil 1). Robot Walli 2.5 programlama dili ile kontrol edilmektedir. Pozisyon veri dosyaları, pozisyonların teker teker robota tanıtılması (öğretilmesi) ve kaydedilmesi yoluyla oluşturulmaktadır. Serpent I robotu için üretici firmanın verdiği özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Serpent Robot Anatomisi.

Çizelge 1. Serpent I Robot Kolunun Özellikleri [5].

Serbestlik derecesi (x, y, z, θ)	: 4
Birinci kol uzunluğu	: 250 mm
İkinci kol uzunluğu	: 150 mm
θ ₁ eksenini (omuz hareketi)	: 200°
θ ₂ eksenini (dirsek hareketi)	: 250°
Döndürme eksenini (bilek hareketi)	: 450°
Z eksenini (yukarı-aşağı)	: 75 mm
Kontrol sistemi	: 12 bit
Toplam çözünürlük	: 0.3728 mm
Tekrar edebilirlik	: 1.0 mm
Maksimum uç hızı	: 550 mm/s
Taşıma kapasitesi	: 2.0 kg

Sunulan yaklaşımda istenen hedeflere ulaşmak için aşağıdaki aşamalardan oluşan çalışma metodu izlenmiştir.

1. AutoCAD çizimlerinin yapılması ve DXF formatına dönüştürülmesi.
2. Çizim elemanlarının yörünge denklemi olarak tanımlanması (doğru, çember ve yay denklemleri).
3. Yörüngelerin ara noktalarının kartezyen koordinat sisteminde hesabı.
4. Ara noktaların robot kol açısı olarak ifadesi için ters dönüşüm formülasyonu.
5. Kol açılarının robot verilerine dönüştürülmesi için formülasyon.
6. Oluşturulan algoritmayla Turbo Pascal programlama dilinde yazılım oluşturulması.
7. Robot için oluşturulan pozisyon veri dosyalarının WALLI 2.5'a transferi.
8. Yörünge izleme uygulamaları.

DXF Formathlı Dosyaların Yörünge Denklemlerine Dönüştürülmesi

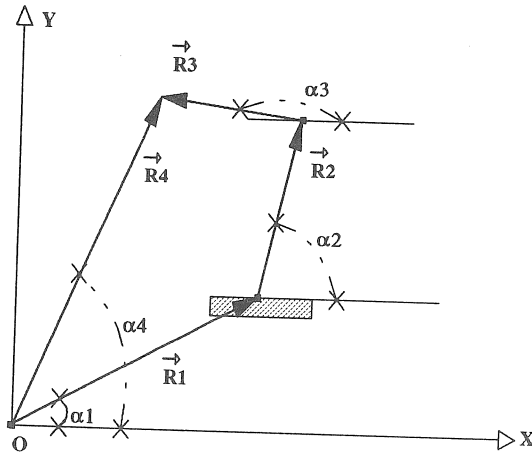
AutoCAD'de oluşturulan iki boyutlu çizimler, temel çizim elemanları olan doğru (line), yay (arc) ve çemberden (circle) oluşan iki boyutlu resimlerdir.

Yörünge planları AutoCAD programında DXF formatlı hale getirilir. DXF formatlı dosyalar temel çizim elemanlarına ait geometrik bilgileri içerir. TURBO PASCAL 6.0'da hazırlanan programlar bu bilgileri okuyabilmektedir. Geometrik bilgiler çizim elemanı ve bulunduğu konumu tanımlar. Çizilen iki boyutlu çizimleri istenilen bir sabit açısız ya da doğrusal artışla eşit uzaklıkta noktalara bölerek bu noktaların konumlarının belirlenmesi için çizim elemanlarının yörünge denklemleri ile ifade edilmesi gerekir. Yörünge denklemleri doğru, yay ve çember denklemlerinden oluşur [1].

Ters Dönüşüm Formülasyonu

Kartezyen koordinat sisteminde hesaplanan konum verileri, robot kollarının açısız değerleri ile ilişkili mafsız koordinat sistemine dönüştürülmelidir. Ters dönüşüm formülasyonu ile ilgili benzer çalışmalar Groover ve ark. [6] tarafından yapılmıştır.

Şekil 2'de problemin vektörel tanımlaması görülmektedir. R_1 vektörünün doğrultusu ve büyüklüğü bilinmektedir. R_2 ve R_3 vektörlerinin büyüklüğü, robotun kol uzunluklarının bilinmesi nedeniyle biliniyor. R_4 vektörü ise robot kolunun uç noktasının olmasını istediğimiz noktayı gösteren $P_K(0, 0)$ noktasına göre konum vektörüdür. Bu vektör yörünge denklemlerinden bulunacak noktalardan oluşturulacağından doğrultusu ve büyüklüğü hesaplanabilecektir. R_4 kartezyen koordinat sisteminde orijinden doğru ya da çember denklemleri ile elde edilecek $P_K = (x, y)$ olarak belirlenen yörünge üzerindeki noktaya çizilen vektördür. Şekil 2'deki vektör poligonunun çözümü ile robot kollarının $P_K = (x, y)$ konumunda yaptıkları açılar elde edilecektir. Kolların yaptıkları açılar mafsız koordinat sisteminde $P_K = (\alpha_1, \alpha_2)$ olarak ifade edilebilir. Bu açıların robot verilerine dönüştürülmesi ile robot koordinat sisteminde $P_R = (\Theta_1, \Theta_2)$ olarak elde edilecektir.



Şekil 2. Konumların Vektörel Tanımlaması.

Oluşturulan vektör poligonunun denklemi $R_4 = R_1 + R_2 + R_3$ şeklinde ifade edilir [7]. Bu denklemde R_2 ve R_3 vektörlerinin doğrultusu aranmaktadır. Kartezyen koordinat sisteminde doğru, çember ve yay denklemleri enterpolasyon fonksiyonu olarak kullanılır. Bu denklemlerden yörünge üzerindeki ara noktalar hesaplanır. Bulunan pozisyonların robot kol açılarına dönüştürülmesi için Eşitlik 1 ve 2 elde edilmiştir [4].

$$\alpha_2 = 2 \arctan \left(\frac{-k_3 \pm \sqrt{(k_3^2 + k_2^2 - k_1^2)}}{k_1 - k_2} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_3 = 2 \arctan \left(\frac{-k_6 \pm \sqrt{(k_6^2 + k_5^2 - k_4^2)}}{k_4 - k_5} \right) \quad (2)$$

Burada,

$$k_1 = \left[R_1^2 + R_2^2 + R_4^2 - R_3^2 - 2R_1R_4 \cos(\alpha_1 - \alpha_4) \right],$$

$$k_2 = \left[2R_1R_4 \cos \alpha_1 - 2R_2R_4 \cos \alpha_4 \right],$$

$$k_3 = \left[2R_1R_2 \sin \alpha_1 - 2R_2R_4 \sin \alpha_4 \right],$$

$$k_4 = \left[R_1^2 + R_3^2 + R_4^2 - R_2^2 - 2R_1R_4 \cos(\alpha_1 - \alpha_4) \right],$$

$$k_5 = \left[2R_1R_3 \cos \alpha_1 - 2R_3R_4 \cos \alpha_4 \right],$$

$$k_6 = \left[2R_1R_2 \sin \alpha_1 - 2R_3R_4 \sin \alpha_4 \right]$$

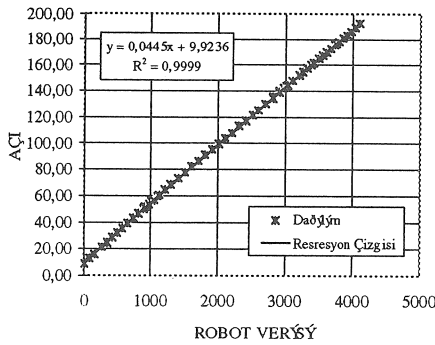
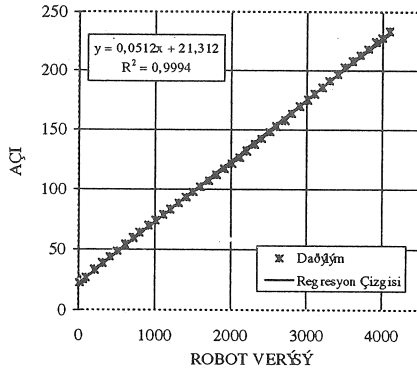
tanımları yapılarak Eşitlik 1 ve 2 ile dönüşüm denklemleri oluşturulur. Eşitlik 1 ve 2 seçilen koordinat sisteminde yörünge denklemlerinden bulunacak noktalar için robot kollarının açılarını veren denklemlerdir. Bulunan α_2 ve α_3 değerleri, robot kola çıları olan Θ_1 ve Θ_2 değerlerine dönüştürülür ve robot veri sistemine göre ifade edilir.

Bu aşamada bulunan değerler kolların yaptıkları derece cinsinden açılardır ve robotun pozisyonunu tanımlamaktadır. Ancak Walli 2.5 için kolların derece cinsinden yaptıkları açılarının bir anlamı yoktur. Gerçekte Θ_1 'in yaptığı $0 - 200^\circ$ arasındaki açısal değişim, robotun kontrol sisteminde $0 - 4095$ nümerik değerleri arasında tanımlanmıştır. Aynı şekilde, Θ_2 'nin yaptığı $0 - 250^\circ$ arasındaki açısal değişim, robot kontrol sistemi tarafından yine $0 - 4095$ nümerik değerleri arasında ifade edilmiştir. Sonuçta bulunan derece cinsinden açısal değerlerin robot kontrol sisteminin tanıyabileceği nümerik değerlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Robot verilerine dönüşüm için deneysel bir yöntem benimsenmiştir. Yapılan deneylerde robotun bulunduğu

pozisyonu kağıt üzerine işaretlemesi sağlanarak, işaretlenen noktanın okunan robot verilerine karşılık hangi kol açılarına sahip olduğu bir açı ölçeyle ölçülerek bulunmuştur. Robot verilerine karşılık gelen kol açılarının dağılım grafiği çizilerek regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinden bulunan Eşitlik 3 ve 4 robotun kol açılarının robot verilerine dönüştürülmesi için önerilmiştir.

$$\alpha_3 = 0.0512 * \Theta_2 + 21.312 \quad (3)$$

$$\alpha_2 = 0.0445 * \Theta_1 + 9.9536 \quad (4)$$



Şekil 3. Robot Verilerine Dönüşüm için Regresyon Analizi.

Yardımcı Veri Hazırlama Programları

Yörünge denklemlerinden elde edilen yörünge üzerindeki noktaların konumlarından ters dönüşüm ile robot kol açıları hesaplanmaktadır. Robot kol açıları Eşitlik 3 ve 4 kullanılarak robot verilerine dönüştürülmektedir. Yörünge üzerindeki nokta sayısı seçilen açısız ya da doğrusal artış miktarlarına bağlı olarak değişmektedir. TURBO PASCAL 6.0 programlama ortamında geliştirilen SERP1.EXE yazılımı DXF formatlı dosyaların okunmasından bunların robot verisi

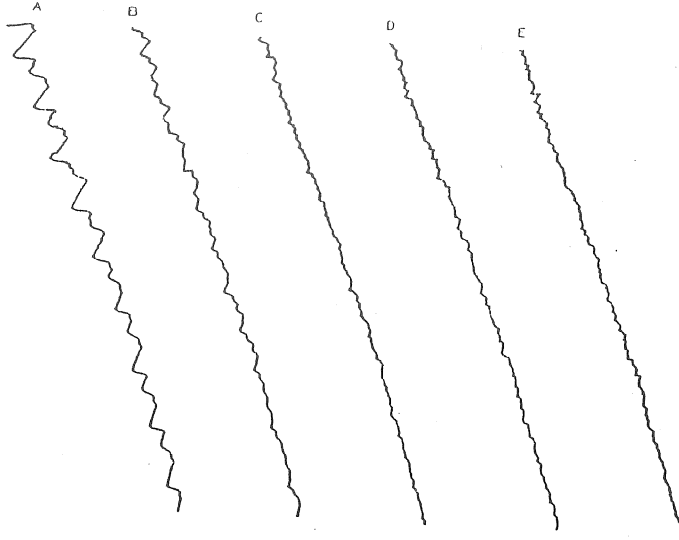
haline dönüştürülmesi aşamasına kadar tüm işlemleri yapmaktadır. Bu programa ilaveten robot kontrol sisteminin 250 pozisyon verisinden daha fazlasını transfer edememesi sebebiyle başka bir programın da geliştirilmesi gerekmiştir. SERP2.EXE yazılımı, SERP1.EXE tarafından oluşturulan robot veri dosyasını 250 pozisyon içerecek şekilde parçalara ayırarak WALLI 2.5 robot programlama diline transfer etmektedir. WALLI 2.5 programı çalıştırıldığında önce SERP1.EXE'yi çağırarak DXF dosyasının, açısız ve doğrusal artış miktarlarının seçilerek yörünge üzerindeki tüm pozisyon verilerinin oluşturulmasını sağlamaktadır. Daha sonra bir döngü içerisinde SERP2.EXE'yi çağırarak pozisyon verilerini 250'lik paketler halinde transfer etmektedir.

Yörünge İzleme Kontrolü

Yardımcı veri hazırlama programları ile desteklenen WALLI 2.5, Serpent robotu kontrol etmektedir. AutoCAD'de oluşturulan iki boyutlu çizimlerin robot tarafından nasıl izlendiğini gözlemek amacıyla robot için imal edilen çizici uç robotun tutucu ucunun yerine takılmıştır. Robotun izlediği yörüngeler bir kağıda çizdirilerek, robota yaptırılan çizimlerle AutoCAD çizimleri karşılaştırılmaktadır.

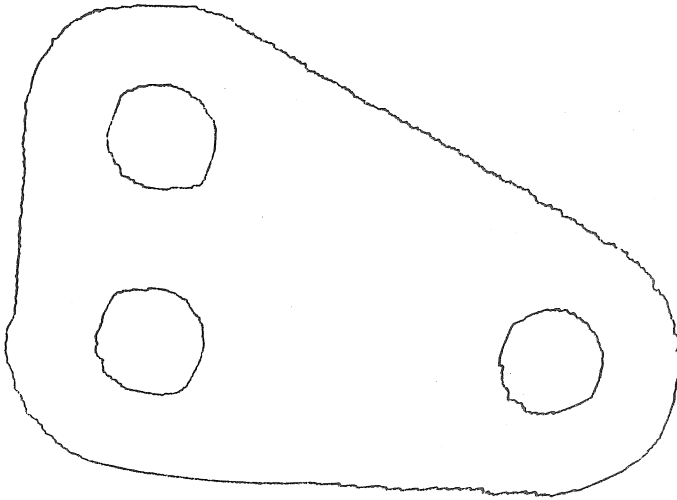
ARAŞTIRMA BULGULARI

Bilgisayar destekli tasarım sisteminde çizilen iki boyutlu yörüngeleri izleyebilme özelliği kazandırılan Serpent robotunun, yörünge izleme başarısını belirleyebilmek için çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Bu amaçla AutoCAD R12'de temel çizim elemanları (line, circle, arc) kullanarak robotun izlemesini istediğimiz yörüngeler çizilmiş ve oluşturulan dosyalar DXF uzantılı olarak kaydedilmiştir. Daha sonra bu dosyalar geliştirilen programlar tarafından okutulmuş ve değişik doğrusal ve açısız artış tanımlamaları yapılarak ucuna kalem takılan robota yörüngeler çizdirilmiştir. Yapılan uygulamalarda doğrusal artışın 0.01, 0.25, 0.5, 1 ve 2 mm ve açısız artışın 0.1°, 1°, 2°, 3° ve 4° olduğu durumlarda yörüngeler çizdirilmiştir. Çizdirilen yörüngelerin hassasiyetlerindeki değişimler gözlenerek en iyi artış miktarları tespit edilmiştir. Şekil 4'de 0.5 mm'lik doğrusal artışın en iyi olduğu gözlenmektedir. Daha küçük bir doğrusal artışla, yani daha fazla nokta ile yapılan yörünge izleme uygulamaları daha hassas sonuçlar vermemektedir. Açısız artış için ise 1° en iyi sonucu vermektedir. 0.1° ile yapılan çizimlerde yörünge izleme süresi dokuz kat artmasına rağmen hassasiyette bir değişiklik olmamaktadır. En iyi artış durumlarına göre çizilen makina parçaları Şekil 5 ve 6'da görülmektedir. Burada dikkati çeken diğer bir husus robotun her konum ve her açıdaki hareketi aynı düzgünlükte çizmediğidir. Manipülörün robot çalışma alanında her noktada ve her yöndeki hareket için aynı hassasiyeti göstermemesi homojen bir hassasiyet tanımlaması yapmayı zorlaştırmaktadır.

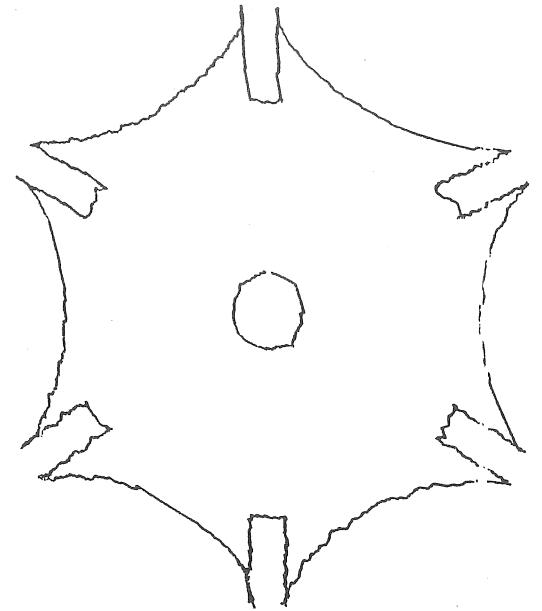


CİZİM	DOĞR.ARTIŞ	NOKTA SAYISI	SÜRE
A	2 mm	24	11.48 s
B	1 mm	42	14.18 s
C	0.5 mm	78	24.66 s
D	0.25 mm	150	44.93 s
E	0.01 mm	367	105.68 s

Şekil 4. Doğrusal Yörüngenin Değişik Doğrusal Artışlarla İzlenmesi.



Şekil 5. Üçgen Makina Parçası Yörüngesinin 0.5 mm ve 1° artışla izlenmesi.



Şekil 6. Cenova Çarkından Oluşan Yörüngenin 0.5 mm ve 1° Artışla İzlenmesi.

Noktalar birbirine ne kadar yakın seçilirse seçilsin, robotun yörünge izleme hassasiyeti daha fazla geliştirilememektedir. Robotun kontrol çözünürlüğü ve tekrar edebilirliğinin imkan verdiği ölçüde hassasiyet sağlanabilecektir. Ayrıca robotun noktalar arasında koordinasyonsuz hareket yapması ve SCARA tipi robotun yatay düzlemde esneme kabiliyetinin olması diğer etkenlerdir [3].

Yapılan çizimlerde çizgilerin doğru konumlandırıldığı ve büyüklüklerin planlananlara uygun olduğu gözlemlenmiştir. Robotun büyük ölçüde doğru noktalarda konumlandığı ancak noktadan noktaya harekette hızların kontrol edilememesi ve koordinasyonsuz hareket yapmasının etkisiyle dalgalanmaların oluştuğu sonucu görülmektedir.

Yapılan yörünge izleme uygulamalarında yörünge boyunca tanımlanan nokta sayısı ile yörüngeyi tamamlama süresi arasında bir dağılım grafiği çizilerek regresyon analizi yapılmıştır. Sonuç olarak doğrusal bir ilişki olan Eşitlik 5 çıkarılmıştır. Böylece robotun yörünge izleme hızı nokta sayısına bağlı olarak tespit edilecektir.

$$\text{Süre [saniye]} = 0.2163 (\text{Nokta sayısı}) + 4.3241 \quad (5)$$

Planlanan yörüngelerin robot tarafından izlenmesi yapılan çalışmayı amaçlarına ulaştırmaktadır. Kontrol çözünürlüğünün ve tekrar edebilirliğin daha iyi olduğu sistemlerde daha iyi yörünge izleme hassasiyetinin gözleneceği aşıkardır. Ancak bu durum sunulan yaklaşımın geçerliliğini etkilememektedir.

SONUÇLAR

Serpent robotunun programlama dili olan WALLI 2.5, robota basit al ve yerleştir işlerini yaptırmak için

tasarlanmış olduğundan komut sayısı ve yeterliliği açısından kısıtlı bir dildir. Ayrıca; WALLI 2.5 robotun motor hızlarını kontrol etmemektedir. Robot kontrol sistemi motorları sürekli olarak maksimum hızlarda çalıştırarak robotun koordinasyonsuz noktadan noktaya hareket yaptırmaktadır. Bu çalışmada Serpent robotuna robotun kontrol çözünürlüğü ve tekrar edebilirliği elverdiği hassasiyette yörünge izleme özelliği kazandırılmıştır. WALLI 2.5 robot programlama dilinin bilgisayar destekli tasarım sistemlerinden veri transfer edememesi ve kartezyen koordinatlara ya da robot kol açılarına bağlı pozisyon tanımlaması yapmaması nedeniyle yardımcı yazılımlar geliştirilerek robot verileri oluşturulmuştur. WALLI programlama mantığı gidilecek her pozisyonu robota tek tek tanıtilmasını gerektirmektedir. Yörünge izleme uygulamalarında ise robota pozisyonların tek tek tanıtilması değil birbirine yakın bir çok noktadan oluşan yörüngeyi hesaplama yoluyla elde edilmesi gerekir. Bu bağlamda geliştirilen yazılımlar AutoCAD çizim programı ile WALLI 2.5 arasında bir köprü kurmaktadır. AutoCAD'de planlanan yörüngeler TURBO PASCAL 6.0 ortamında geliştirilen yazılımlarla robot verilerine dönüştürülmektedir ve oluşturulan veriler robot tarafından izlenmektedir. Yapılan yörünge izleme uygulamaları metodun geçerliliğini göstermektedir.

Yörünge izleme uygulamalarında, robota izlediği yörüngeyi bir çizici uç yardımıyla çizdirerek, bu çizimler hassasiyet ve çizim süresi yönünden birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan çizimlerin hassasiyeti, planlanan yörüngeyi eşit aralıklara bölen noktaların sayısına bağlıdır. Yapılan karşılaştırmalar sonucu robotun çizim elemanı üzerinde ne kadar yakın nokta seçilirse o derece hassas çizim yaptığı, ancak buna karşın yavaşladığı anlaşılmıştır. Noktalar arasındaki mesafe daraltılırken, yani yörünge üzerindeki nokta sayısı artırılırken, tespit edilen adım değerlerinden sonra nokta sayısı ne kadar artırılırsa artırılın hassasiyetin iyileşmediği gözlenmiştir. Bunun nedeni robotun 0.3728 mm olan kontrol çözünürlüğü ve 1 mm olan tekrar edebilirlik kısıtlarıdır.

Yardımcı Veri Hazırlama Programları Serpent robotun verilerinin hazırlanmasında daha kolay, daha hızlı ve daha esnek bir yaklaşım sunmaktadır. Örneğin basit ya da karmaşık geometrilerin nokta kaynağı işlerini rahatlıkla programlayabilecek düzeydedir. Geliştirilen yardımcı veri hazırlama programları Serpent robotlar için yüzlerce noktanın tek tek tanıtilması anlamına gelen zahmetli ve uzun süre alıcı işlerden kurtulma olanağı tanıyacaktır.

CONTROL OF SCARA INDUSTRIAL ROBOT MOVEMENTS WITH COMPUTER AIDED PROGRAMS

In this study, unco-ordinated point to point controlled SCARA type Serpent assembly robot arm has been enabled to trace continuous path trajectories

by using robot data transformed from two dimensional pictures drawn at a computer aided design system. For reaching this aim some data generation computer programs, which support WALLI 2.5 programming language of the robot, were developed in TURBO PASCAL 6.0 in order that the robot is forced to track planned trajectories designed in AutoCAD R.12. The data generation computer programs running with WALLI 2.5 programming language are used to rapidly generate required robot position data and transfer them to robot control system. As a result, robot can track planned trajectory in constraints of its control resolution and repeatability. Normally, WALLI 2.5 control program of Serpent robot arm is designed for pick and place tasks. However, prepared data generation computer programs support WALLI 2.5 allowing the robot to be used in applications such as welding, laser and water-jet cutting.

KAYNAKÇA

1. Aktaş, Z., Öncül, H. ve Ural, S., *Sayısal Çözümleme*, Cilt 1, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 1991.
2. Arslan, H., *Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ve Nümerik Kontrollü (NC) Tezgahların Entegrasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Makina Müh. Çukurova Üniversitesi, Adana, 1996.
3. Becker, D., Gay, R., *Serpent Robot Review*, *Practical Electronics*, September (1985), 39-43.
4. Ertürk, M., *Scara Tipi Robot Kolunun Hareketlerinin Bilgisayar Destekli Programlarla Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Makina Müh. Çukurova Üniversitesi, Adana, 1997.
5. Feedback Instruments Ltd., *Walli 2.5 Serpent Manual*, Crowborough, UK, 1993.
6. Groover, M.P., Weiss, M., Nagel, R.N., Odrey, N.G., *Industrial Robotics: Technology, Programming and Application*, McGraw-Hill, Inc., Singapore, 1986.
7. Köseoğlu, M., Yılmaz, Y., *Mekanizma Tekniği*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1987.
8. Ünver, E., *CNC Torna Tezgahlarında Kesme Parametrelerinin Teorik ve Deneysel Analizi - Parça Programı Optimizasyonu*, Doktora Tezi, Makina Müh. Çukurova Üniversitesi, Adana, 1994.
9. Şişman, A., *Palletizing Software Developed for Multifunctional Use of an Industrial Robot*, Yüksek Lisans Tezi, Makina Müh. Böl. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 1994.
10. Yu, D.Y., Duan, Z.C., Sun, H.D., Li, P.G., *Automatic Generation of the Cutting Tool Path for Free - Form Surfaces*, *Journal of Materials Processing Technology*, 36 (1993), 415-425.

Boruların Eksenel Buruşmasının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi

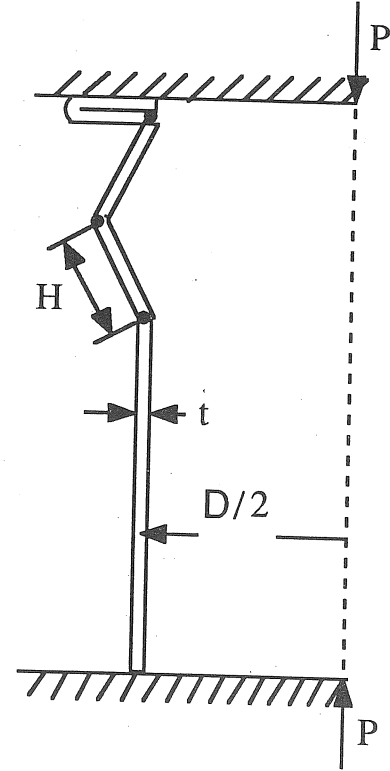
Ali Çolakoğlu
Araştırma Görevlisi
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

Bu çalışmada basma yükü altında, eksenel simetrik olarak buruşan ve ince et kalınlığı olan silindirik boruların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi yapılmıştır. Modelleme için ABAQUS Versiyon 5.4 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Ortalama basma yükünün değişimi ve oluşan simetrik halka uzunluklarının teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır.

GİRİŞ

Kinetik enerji tutucu sistemlerin tasarımı yıllarca makina mühendisliğinin ilgi alanlarından biri olmuştur. Özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayinde pekçok uygulamaları olan bu sistemlerde kullanılan başlıca mekanik elemanlardan biri ince et kalınlığı olan silindirik borulardır [1].

Basıldığında eksenel simetrik olarak buruşan borular ile ilgili çalışmalar Alexander [2] tarafından ortaya konan ilk model ile başlamıştır (Şekil 1). Boru basımı için gerekli ortalama basma yükünü ve oluşan eksenel simetrik halka uzunluğunun bulunabilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Timoshenko ve Gere [3], Abramowicz ve Jones [4] bu konuya katkılarda bulunmuşlardır. Geliştirilen bu teorilerin gözden geçirilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılması bir önceki çalışmada verilmiştir [5]. Geliştirilen teorilerin tümü boruların eksenel yük altında buruşması için gerekli ortalama basma yükünü ve oluşacak olan halka uzunluklarını hesaplayabilmektedir. Halbuki basma yükü deneylerden de gözlemlendiği gibi basma sırasında sabit kalmamaktadır. Yük-yer değiştirme eğrileri dalgalı bir şekil vermektedir. Bu dalgalı şekilde oluşan tepe yüklerinin sayısı, oluşan simetrik halkaların sayısına eşittir. Ayrıca ilk halkanın oluşumuna karşılık gelen ilk tepe yükünün diğer tepe yük değerlerine göre daha büyük olduğu gözlenmektedir. Halka oluşumunda, ilk katmanın boru çeperinin içerisine doğru hareketi ile başlaması da dikkate değer bir noktadır.



Şekil 1. Boruların eksenel simetrik buruşma modeli [2]
(Yarı kesit)

Teorik modeller halka uzunluğunun ne kadarının boru çeperinin içerisinde, ne kadarının boru çeperinin dışarısında oluştuğuna ait bir bilgi verememektedir. Bu karmaşık yük-yer değiştirme özelliklerini veremeyen teorik modellerin yetersiz kalması sonucunda sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapılmasına karar verilmiştir. Bu çalışmada, önceki çalışmanın devamı olarak boruların aksenal buruşması sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Gerekli ortalama basma yükü, tepe yükü ve oluşacak aksenal simetrik halka uzunluklarına ek olarak yük-yer değiştirme eğrisi bir bütün olarak incelenebilmiş ve halkaların oluşumları gözlenebilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunan değerler, teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Boruların Buruşma Teorileri

Boruların aksenal yük altında buruşmaları için geliştirilen analitik modeller aşağıda özetlenmiştir [5].

Akma sınırı (Y) olan malzemeden imal edilmiş, ortalama çapı (D), et kalınlığı (t) olan bir boruyu aksenal yönde basmak için gerekli olan ortalama basma yükü (P) aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunabilir.

$$P = Y [(p^2 / 2k \sqrt{3}) + \pi k] t^{1.5} \sqrt{D} \quad (1)$$

Burada (k) sabit bir sayıdır. Basma sırasında oluşan yuvarlak yüzeyli halkaların uzunlukları, (H) ise şöyle hesaplanabilir.

$$H = k \sqrt{Dt} \quad (2)$$

Alexander [2], basma sırasında oluşan halkaların kalınlıklarını ihmal ederek yaptığı analitik çalışmada (k) değerini 0.952 olarak bulmuştur. Timoshenko ve Gere [3] bu değeri, ince silindirik kabukların elastik belverme analizinde 1.222 olarak vermiştir. Abramowicz ve Jones [4], ihmal edilemeyecek halka kalınlığını ve gerinim sertleşmelerini de hesaba katarak, aşağıdaki eşitliği tanımlamışlardır.

$$P = Y (6.07) t^{1.5} \sqrt{D} / [0.86 - 0.568 (t/D)^{1/2}] \quad (3)$$

Buruşma Deneyi

Teorik olarak bulunan değerlerin deneysel değerlerle karşılaştırmasını yapabilmek için soğuk çekilmiş yumuşak çelikten (BS 3602-CFS 360) imal edilmiş dikişsiz borular universal çekme-basma deney cihazında basılmıştır. 100 mm uzunluğundaki boruların dış çapı 28.5 mm ve et kalınlığı 1.5 mm dir. Deneysel çalışma ve sonuçların teorik verilerle karşılaştırılması bir önceki çalışmada detaylı olarak verilmiştir [5].

SONLU ELEMANLAR MODELİ

Analiz için ABAQUS Versiyon 5.4 sonlu elemanlar paket programı [6] kullanılmıştır. Modelleme aşağıdaki basamakları içermektedir.

Ağ Yapısı

Eksenel yük altında silindirik boru basılması 3-boyutlu bir şekil verme işlemidir. Ancak silindirik borular aksenal simetriğe sahip olduğu için, model 2-boyuta indirgenebilmektedir. Eksenel simetriğe sahip, 2-boyutlu elemanlardan oluşan homojen bir ağ analiz için yeterli olmaktadır. Bu ağ için 2-düğümlü aksenal simetrik elemanlar (ABAQUS eleman tipi SAX 1) seçilmiştir. 100 mm boru uzunluğu için 100 elemanlı bir ağ oluşturulmuştur.

Malzeme Özellikleri

Laboratuvar deneylerinde kullanılan [5] soğuk çekilmiş yumuşak çelikten (BS 3602-CFS 360) imal edilmiş dikişsiz borunun malzeme özellikleri kullanılmıştır. Tek aksenal çekme testiyle belirlendiği üzere malzemenin akma sınırı, Y=521 MPa, elastik modülü, E=207 GPa ve Poisson oranı, $\nu = 0.3$ olarak alınmıştır. İzotrop-sertleşen malzeme varsayımı yapılmıştır.

Sınır Koşulları

Eksenel simetrik sınır koşulları kabul edilmiştir. Borunun bir ucundaki düğüm, sadece boru basma akseni yönünde serbest bırakılmıştır. Bu serbestlik basmayı yapan tezgah kafasının hareketine karşılık gelmektedir. Düğümün diğer yönler için serbestliği kısıtlanmıştır. Borunun diğer ucu bir rijit yüzey üzerine temas ettirilmiştir. Bu yüzey ile borunun dokunan kısımları arasındaki sürtünme katsayısı 0.1 olarak varsayılmıştır. Borunun bu ucundaki düğümü bütün yönler için hareket serbestliğine sahip olup borunun buruşmasına imkan tanımaktadır.

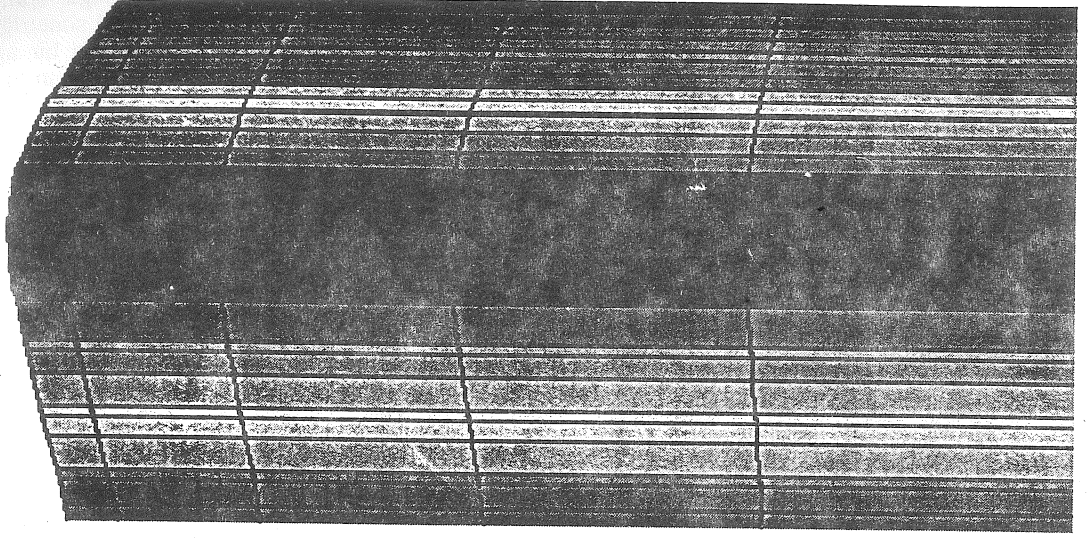
Yükleme

Boruya aksenal yönde 40 mm basma uygulanmıştır. Şekil değişikliğine uğramış ağ örnekleri Şekil 2' de verilmiştir. Geometri aksenal simetrik olduğu için şekillerde 1 numaralı eksen radyal eksenine, 2 numaralı eksen ise yer değiştirme veya basma yönüne karşılık gelmektedir.

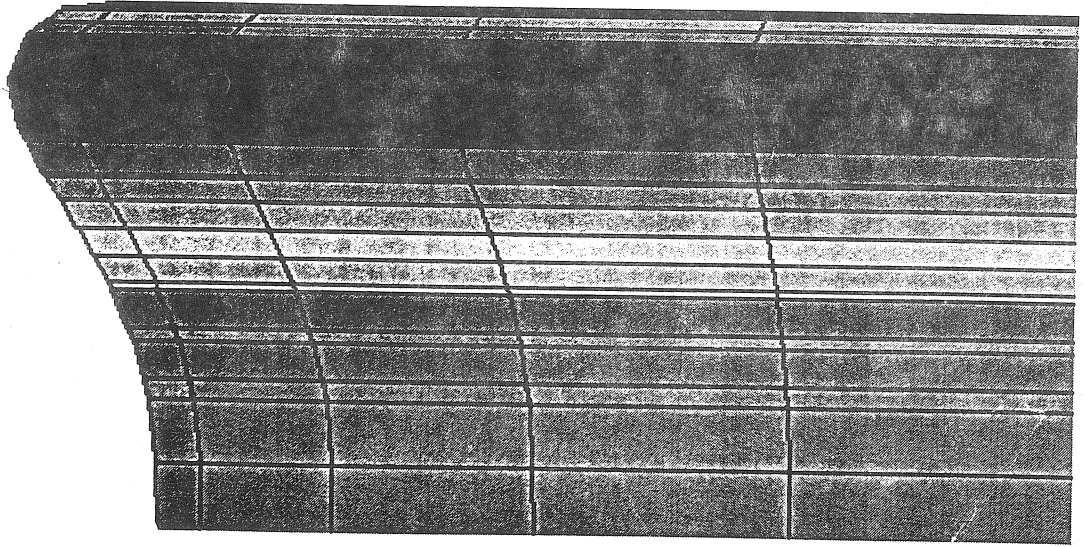
TARTIŞMA VE SONUÇ

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunan değerlerin teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 1' de özetlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi deneysel olarak elde edilen eğriyle birlikte Şekil 3' te verilmiştir.

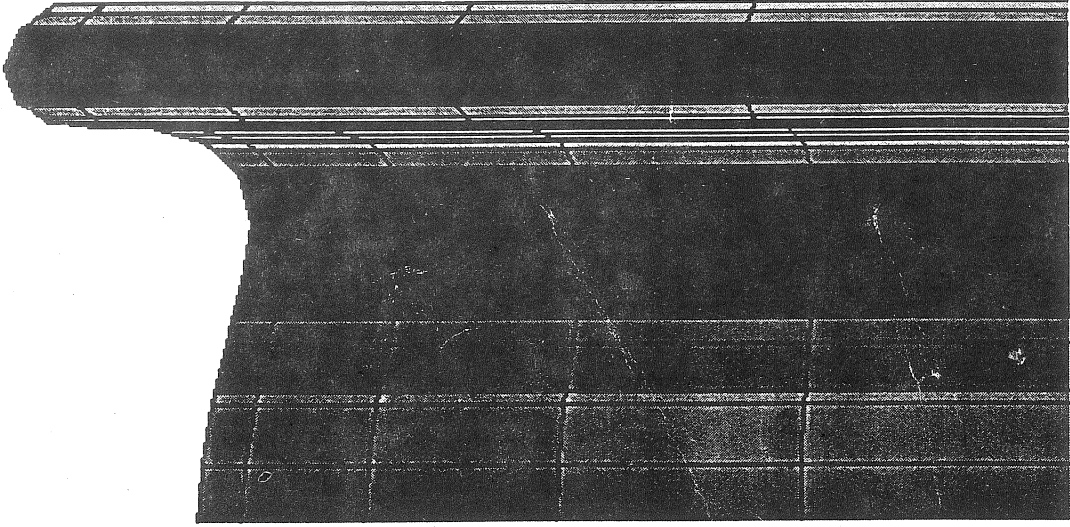
Daha önceki çalışmada tesbit edildiği gibi teorik modeller buruşma için gerekli ortalama basma yükünü deneysel sonuçlara göre daha az olarak vermektedirler. Deneysel değerlere en yakın sonucu Abramowicz ve Jones'ın teorisi vermiştir. Bu tahmin etme eğilimi sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen değerler için de görülmüştür. Sonlu elemanlar modeli ile ortalama



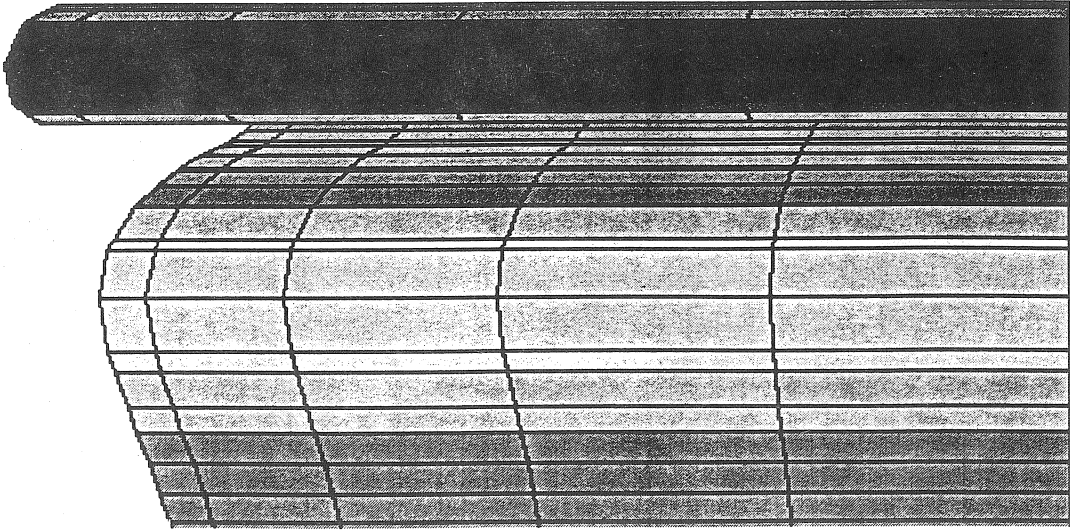
(a)



(b)

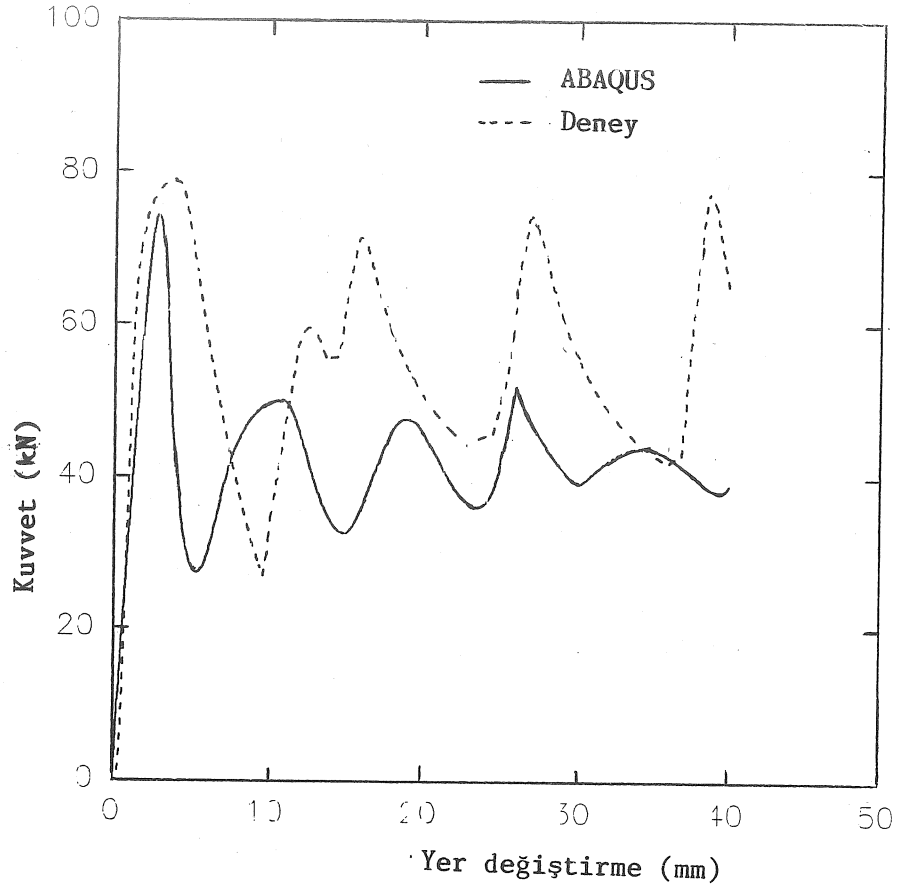


(c)



(d)

Şekil 2. Boru Ucunun Aksenal Buruşma Safhaları (Yarı Kesit), (a) Yer değişimi = 5.6 mm, (b) Yer değişimi = 10.5 mm, (c) Yer değişimi = 15.1 mm, (d) Yer değişimi = 21.9 mm.



Şekil 3.Yük-Yer Değişirme Eğrileri

basma yükü 41.2 kN olarak bulunmuştur ve bu değer deneysel değerlerden %23 daha azdır. Fakat bu değer mevcut en iyi analitik model olan Abramowicz ve Jones'ın teorisi ile elde edilen değer ile yaklaşık olarak aynı değeri vermiştir.

Tablo 1. Ortalama Basma Yükü ve Silindirik Halka Uzunlukları

Açıklama	Ortalama basma yükü P [kN]	Halka uzunluğu H [mm]
ABAQUS sonucu	41.2	4.5
Deneysel sonuç	53.4	6.4 ± 3
Abramowicz ve Jones'ın teorisi	41.6	-
Timosenko'nun teorisi	30.7	7.8
Alexander'in teorisi	29.8	6.1

Mevcut teoriler ortalama basma yükünün belirlenmesi için geçerlidir. Buruşmanın başlangıç

safhasında oluşan ilk tepe yükünü ve dalgali yük-yer değiştirme değerini analitik modellerle elde etmek mümkün olmamaktadır. Sonlu elemanlar metodu bu karmaşık safhaların modellenmesine imkan tanımıştır. İlk tepe yük değeri sonlu elemanlar yöntemiyle 73.3 kN olarak bulunurken deneysel olarak elde edilen değer 78.9 kN'dur. Sonlu elemanlar yöntemi ile % 7 daha az bir ilk tepe değeri bulunmuştur ve bu kabul edilebilir hata sınırları içerisinde. Deneylerde gözleendiği gibi tepe yük sayısı buruşma sırasında oluşan aksenal simetrik yuvarlak yüzeyle halka sayısına eşittir. Aynı sayıdaki tepe yük değeri sonlu elemanlar modelinde de elde edilmiştir. Fakat sonlu elemanlar modelinde tepe yük değerleri daha az yer değiştirme değerlerinde gözlenmiştir.

Buruşmanın ilk safhalarını gösteren çıktılar Şekil 2'de verilmiştir. Şekiller basma eksenine göre yarı kesit olup yalnızca borunun buruşan ucunun farklı yer değiştirme değerleri için radyal yöndeki hareket miktarlarını vermektedir. Bu şekil değişikliği deneyler sırasında gözlenen şekil değişikliği ile uyum içerisinde. Sonlu elemanlar modeli, analitik modellemesi çok karmaşık olan buruşmanın ilk safhalarına açıklık getirmiştir. Burada önemle belirtilmesi gereken konu basma başlangıcında boru ucu

içeri doğru hareket etmektedir. Bir süre sonra oluşan ilk halkayı takip eden yeni halkalar devamlı bir S-şekli çizmektedir. Halkalar boru çeperinin ne tümüylü dışında ne de içerisinde oluşmaktadır. Halka uzunluğunun çoğu boru çeperinin dışarısında oluşmaktadır. Tesbit edilen halka uzunluğunun (4.5 mm) 3.2 mm 'si boru çeperinin dışına doğru uzanırken 1.3 mm 'lik kısmı boru çeperinin içerisine doğru uzanmaktadır. Fakat yine de bu değerler deneysel olarak tesbit edilen halka uzunluklarından daha azdır.

Gerinim sertleşmesinin de hesaba katılmasıyla elde edilecek malzeme modeli gerçeğe daha yakın sonuçlar veren bir sonlu elemanlar modeline imkan tanıyacaktır. Böyle bir model özellikle halka uzunluğu değerlerinde bir iyileşme sağlayacaktır. Daha çok elemandan oluşan ağların kullanılması ile hesaplama zamanını artırmakla birlikte daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir. Ayrıca daha çok düğüme sahip elemanlarla (örneğin 4-düğümlü aksenal simetrik katı elemanlar) oluşturulacak bir model daha iyi sonuçlar verebilir. Sonlu elemanlar modelinin geliştirilmesi gelecek çalışmaların temasını oluşturacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmanın yapılması sırasında kullanılan yazılım ve donanım olanaklarını sağlayan ODTÜ-BİLTİR Merkezi'ne teşekkür eder.

FINITE ELEMENT MODELLING OF AXIAL TUBE CRUSHING

In the present paper, finite element modelling of axial crushing of thin-walled tubes was done. For the modelling, ABAQUS Version 5.4 finite element package program was used. The axial mean collapse load for crushing and the axial symmetric fold length predicted were compared with the theoretical and experimental results.

KAYNAKÇA

1. Çolakoğlu, A. ve Yıldırım, R. O., Mekanik Şok Tutucular, Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, ODTÜ Ankara, 2 (1994) 4, 127-137.
2. Alexander, J. M., An Approximate Analysis of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading, Quart. J. Mech. and Appl. Math., 13, (1960), 10-16.
3. Timoshenko, S. P. ve Gere, J. M., Theory of Elastic Stability, Second edition, McGraw-Hill Book Company, 1961.
4. Abramowicz, W. ve Jones, N., Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes, Int. J. Impact Eng., 2 (1984), 236-281.
5. Çolakoğlu, A., Boruların Aksenal Yük Altında Buruşması, Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, ODTÜ Ankara, 2 (1995) 5, 225-230.
6. ABAQUS Hibbit, Karlsson and Sorenson, Inc. Sonlu Elemanlar Analiz Programı, Versiyon 5.4.

YAKIN GELECEKTEKİ KONGRE VE BİLİMSEL ETKİNLİKLER

<u>KONGRE ADI</u>	<u>TARİH</u>	<u>YAZIŞMA ADRESİ</u>
International Conference on Forging and Related Technology ICFT'98	27 - 28 Nisan, 1998 Birmingham, UK	Fiona Bangs/Sam Gosden Conference and Events Department Institution of Mechanical Engineers 1 Birdcage Walk, London SW1H 9JJ U.K. Tel: +44 (0) 171 973 1249/1256 Fax: +44 (0) 171 222 9881 e-mail: icft@imeche.org.uk.
2nd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering IDMME'98	27 - 29 Mayıs, 1998 Universite de Tech. De Compiegne, France	Muriel PETITALOT IDMME'98 Secretariat GSM UTC-BP 20529 60205 COMPIEGNE Cedex FRANCE Tel: (33) 03 44 23 45 78 Fax: (33) 03 44 23 52 84 e-mail: idmme98@utc.fr
International Seminar on Improving Machine Tool Performance	6-8 Temmuz, 1998 Miramar Palace San Sebastian, Spain	FUNDACION TEKNIKER Mr. Javier Garcia Otaola, 20-20600 Eibar SPAIN Tel: 34-43-20 67 44 Fax: 34-43-20 27 57 E-mail: jgarcia@tekniker.es
The First International Conference on Engineering Computational Technology	18 - 20 Ağustos, 1998 Edinburgh, Scotland	Professor B.H.V. Topping Dept. of Mechanical Eng. Heriot-Watt University Riccarton, Edinburgh EH14 4AS, U.K. Tel: 44(0)131-451 3141 Fax: 44(0)131-451 3593
The Fourth International Conference on Computational Structures Technology	18 - 20 Ağustos, 1998 Edinburgh, Scotland	Professor B.H.V. Topping Dept. of Mechanical Eng. Heriot-Watt University Riccarton, Edinburgh EH14 4AS, U.K. Tel: 44(0)131-451 3141 Fax: 44(0)131-451 3593
8. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi UMTIK'98	9-11 Eylül, 1998 Ankara - TÜRKİYE	UMTIK'98 Makina Mühendisliği Bölümü Orta Doğu Teknik Üniversitesi 06531 Ankara - TÜRKİYE Tel: 312 210 5217 Fax: 312 210 1329 E-Mail: umtik@rorqual.cc.metu.edu.tr WEB: http://design.me.metu.edu.tr/umtik/

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. Yayınlanan 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 yayınlar;

Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile Tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.

- (b) Dergide yayınlanacak 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 yayınlanabilir.

- (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. Dergiye 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.

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 quarterly periodical, published by the Turkish Mechanical Design and Production Society, METU, Ankara, Turkey. It is one of the society's aims, to publish qualified research and review papers in Turkish. The published papers are strictly refereed to maintain a high scientific and engineering level at international standard.

MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

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

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayınlanabilir.

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

MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

Yazım Dili

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

Makalelerin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

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

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

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

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

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

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

Başlıklar

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

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

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

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

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

Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, daktilo ile veya elle anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın

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

Birimler

Zorunlu olmadıkça sadece S.I. birimleri kullanılmalıdır. S.I. dışında birim kullanıldığında, fiziksel büyüklüğün S.I. eşdeğeri ve birimi parantez içinde verilmelidir.

Şekiller ve Çizelgeler

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

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

Dip Notu

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

Resimler

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

Kaynakça

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

1. Dergi Makalesi
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

Makaleler yaklaşık 4000 kelimeyi ve 10 adet şekli ve çizelgeyi aşmayacak şekilde hazırlanmalıdır. Makaleler daktilo ile A4 kağıdının tek yüzüne, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır. Şekillerin orjinalleri de dahil olmak üzere makale üç kopya gönderilmelidir.

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

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

YAYIN HAKKI

Dergide yayınlanan makalelerin her türlü yayın hakkı Makina Tasarım ve İmalat Derneği'ne aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin alınmadan başka yerde yayınlanamaz ve çoğaltılamaz.

YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.

1. Örnek dip notu