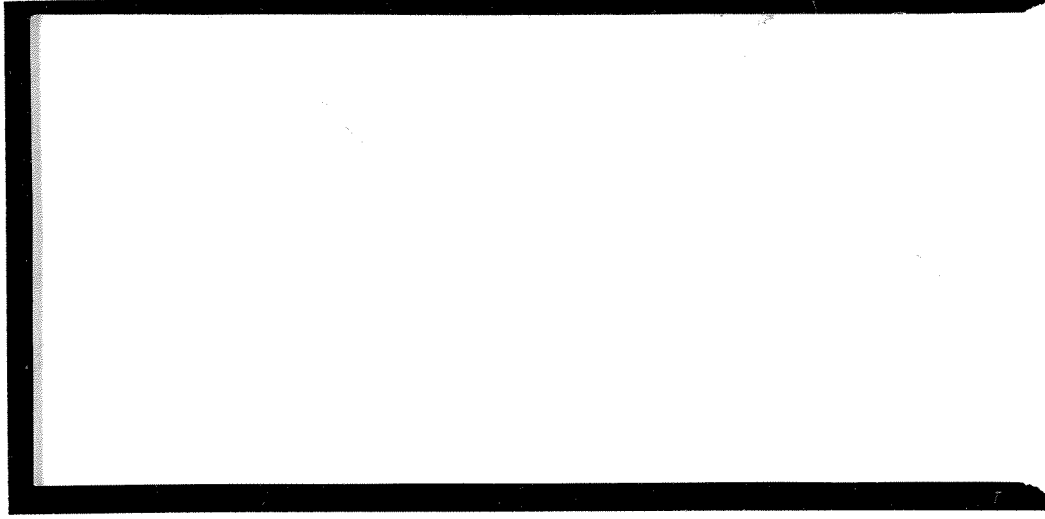




1997-1417 DAP

TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY



Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu

Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee

**Sonlu Eleman Yöntemiyle
Üretim İşlemlerinin
Sayısal Benzetimi**

PROJE NO: MODİSA-11

Prof. Dr.-Ing. A. Erman TEKKAYA

Mak. Müh. Sebahattin KAVAKLI (tüm proje süresince)

Mak. Müh. Murat ŞAVKILIOĞLU (tüm proje süresince)

Mak. Müh. Besim BARANOĞLU (son bir yıl)

Mak. Müh. Çınar GERÇEK (son birbuçuk yıl)

Mak. Müh. Mehmet FIRAT (dört ay)

Mak. Y. Müh. Abdullah ŞEN (ilk altı ay)

MAYIS 1995

ANKARA

ÖNSÖZ

Üretim işlemleri içinde en hızlı gelişmeyi gösteren metal biçimlendirme işlemlerinin en temel özelliği teknoloji üretiminin uzmanların deneyim ve bilgi birikimlerine bağımlı olmasıdır. Bu nedenle, metal biçimlendirme konusunda yapılacak geliştirmeler ve ileri uygulamalar çok uzun ve pahalı bir süreci gerektirmektedir. Oysa bugün otomobil sektörü, beyaz eşya sektörü, havacılık ve savunma sanayi sektörleri yüksek kalitedeki ucuz ve genellikle soğuk biçimlendirilmiş parçalara bağımlıdır. Teknoloji üretimi maliyetini düşürmenin çağdaş bir yöntemi metal biçimlendirme işlemlerinin bilgisayar üzerinde sayısal benzetimi yani simulasyonunu yapmaktır. Bu amaçla, *Sonlu Eleman Yöntemiyle Üretim İşlemlerinin Sayısal Benzetimi* konulu proje önerisi 1992 yılında T.C. Devlet Planlama Teşkilatına sunulmuş ve kaynakların TÜBİTAK'a aktarılması sonucunda proje MODİSA-11 koduyla TÜBİTAK tarafından desteklenmeye başlanmıştır. MODİSA-11 nolu proje yine aynı ad ile T.C. Devlet Planlama Teşkilatı tarafından desteklenen DPT 91K121490 nolu projenin devamı mahiyetindedir. DPT 91K121490 nolu proje iki-boyutlu simulasyonları kapsamış ve başarılı bir sonuçla 1992 yılında tamamlanmıştır. Tamamlanan ilk proje çerçevesinde bir uluslararası dergi ve bir ulusal kongre yayını yapılmıştır. MODİSA-11 nolu proje ise üç-boyutlu simulasyon ile otomatik ağ yaratma sistemlerini ve termomekanik kenetlemeyi içermektedir. Proje süresince bir uluslararası dergi yayını (kabul aşamasında), üç uluslararası ve iki ulusal kongre bildirisi, dört yüksek lisans tezi tamamlanmış veya tamamlanmak üzeredir. Proje süresince altı genç araştırmacı sürekli veya aralıklarla çalışmıştır. İki lisans öğrencisinden bilgisayar ve programlama dilleri konularında da hizmet alımı yapılmıştır. Ayrıca Türk sanayi ile çok yakın ilişkilerde bulunulmuş ve onların desteği ve yol göstericiliğinden yararlanılmıştır. Stuttgart Üniversitesi'nden iki ayrı kürsü ile yakın ilişkiye girilmiş ve onların da deneyim ve bilgilerinden yararlanılmıştır.

Gerek bilimsel ve akademik olarak gerekse teknolojik açılarından başarılı sonuçlandığına inandığım bu araştırma projesine katkıda bulunan tüm kişi ve kuruluşlara en içten şükranlarımı sunarım.

Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya

Ankara, Mayıs 1995

İçindekiler

ÖNSÖZ	ii
ÖZET	vii
ABSTRACT	vii
1 GİRİŞ	1
2 KURAMSAL TEMELLER	8
2.1 Bünye Denklemleri	8
2.2 Varyasyon İlkesi	9
3 SAYISAL ÇÖZÜM	11
4 AĞ-YENİLEME YÖNTEMİ	13
4.1 Temel Yaklaşım	13
4.2 Dış-Ağın Ayrılması	15
4.3 Sınır Ağın Oluşturulması	16
4.4 Kenar ve Köşelerin Oluşturulması	17
4.5 Kısmi Ağ Yenileme	19
4.6 Otomatik Ağ-Yaratma Uygulamaları	19
5 TEMAS MODELİ	19
6 KARŞILAŞTIRMALAR	23

7 UYGULAMA ÖRNEKLERİ	25
7.1 Radial Ekstrüzyon	25
7.2 İki Kademeli Ekstrüzyon	30
7.3 Üç-Boyutlu Dövme	36
8 SONUÇ ve ÖNERİLER	40
KAYNAKÇA	42
EK: UYGULAMA ÖZETİ	46

Şekiller Listesi

1	İç ve dış ağların tanımı: iki-boyutlu görüntü	14
2	İç ve dış ağların tanımı: üç-boyutlu görüntü	14
3	İç ve sınır ağların tanımı: üç-boyutlu görüntü	15
4	İç ve dış düğüm noktalarının tanımı	16
5	Projeksiyon ile elde edilen tipik bir sınır elemanı	17
6	İç-bükey köşelerde projeksiyon problemi	17
7	Kenarlarda projeksiyon	18
8	Kenarlarda oluşan bozuk sınır elemanları	18
9	Otomatik ağ oluşturma uygulamaları	19
10	Otomatik ağ oluşturma uygulamaları	20
11	Otomatik ağ oluşturma uygulamaları	20
12	Temas segmanlarını çevreleyen hiyerarşik bölge tanımları	22
13	Karşılaştırma problemi için ilk ağ	24
14	PLADAN çözümü	24
15	MARC çözümü	25
16	Istavrozun ilk ve son durumu	26
17	Istavrozun üretimi için kullanılan kalıp ve ıstampa	26
18	Istavrozun başlangıç sonlu eleman modeli ve heasplanan son durumu	27
19	Istavrozun sayısal benzetimi sırasında azami ve ortalama ağ kalitesi	28
20	Istavrozun sayısal benzetimi sırasında hacimsel ağ kalitesi	28
21	Istavrozun üretilmiş son durumu için eşdeğer plastik genleme dağımı	29
22	Istampa kuvvetinin ıstampa yolu ile değişimi	30
23	Ön biçimlendirme kademesi için kalıp ve ıstampa	31

24	Asıl biçimlendirme kademesi için kalıp ve ıstampa	31
25	Başlangıç sonlu eleman ağı	32
26	Azami ve ortalama ağ kalitesi	33
27	Hacimsel ağ kalitesi	33
28	İlk otomatik ağ yenilemesi	34
29	İkinci otomatik ağ yenilemesi	34
30	Üçüncü otomatik ağ yenilemesi	35
31	İş-parçasının son durumu ve hız profili	35
32	Üç-boyutlu dövme işlemi için kalıp ve iş-parçası tanımları	36
33	Kalıbın 0.2 birim uzunluk kadar hareketinden sonra elde edilen deforme olmuş ve gevşetilmiş eleman ağları	37
34	Kalıbın 0.46 birim uzunluk kadar hareketinden sonra elde edilen deforme olmuş ve yeni yaratılmış eleman ağları	38
35	Kalıbın son konumdaki deforme edilmiş iş-parçası ve eşdeğer genleme dağılımı	39

ÖZET

Projenin amacı metal biçimlendirme işlemlerinin sayısal benzetimini yapabilen bir sonlu eleman yazılımının geliştirilmesidir. Yazılımın yerel sanayide kullanılabilmesi için güvenilir, hızlı ve geniş bir donanım platformunda çalışabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle malzemenin bünye denklemleri rijit-plastik olarak seçilmiştir. Bünye denklemleri Lévy-Mises akma kuralı, v. Mises akma kriteri ve pekleşmeyi tarifleyen akma eğrisi kullanılarak oluşturulmaktadır. Sayısal çözüm ise Markov değişim ilkesinin ayrıklaştırılmasına dayanmaktadır. Elde edilen doğrusal olmayan sonlu eleman denklemleri doğrudan yenileme ile Newton-Raphson yöntemleri kullanılarak çözümlenmektedir. Tamamıyla otomatik olarak çalışan ağ-yenileme algoritması, doğrusal temas algoritması ve Newton-Raphson stabilatörü özgün kuramsal katkılar olarak sunulmaktadır. Sonlu eleman programı ANSI-C dilinde yazılmıştır. Pre- ve postprosesör olarak ASKA-Mesh/View ticari yazılımı kullanılmaktadır. Geliştirilen yazılım doğruluğu kanıtlanmış çözümler ile sınanmıştır. Ayrıca son derece karmaşık sanayi örnekleri çözülmüş ve raporun son bölümünde tanıtılmıştır.

ABSTRACT

The aim of the project is to develop a finite element code which is able to perform the numerical simulation of metal forming processes. In order to ensure usability of the code by the domestic industry, the code has to be reliable, fast and must be able to run on a wide hardware platform. For this reason, the constitutive equations have been selected as rigid-plastic. The constitutive equations consist of the Lévy-Mises flow rule, the v. Mises yield condition and the flow curve describing the work-hardening of the material. The numerical solution procedure is based on the discretization of the Markov's variational principle. The resulting nonlinear finite element equations are solved numerically by the direct iteration and Newton-Raphson schemes. The completely automatic mesh generator, the linear contact algorithm as well as the Newton-Raphson stabilizer can be declared as novel theoretical contributions. The finite element program has been coded in ANSI-C. The commercially available software ASKA-Mesh/View has been used as the pre-/postprocessor. The developed software has been validated through problems for which correct solutions are known. In the last chapter of this report complicated industrial applications are given.

1 GİRİŞ

Metal iş parçalarının üretimi dört temel yöntemle gerçekleştirilir, (DIN 8580, 1974):

- Döküm,
- Kaynak/lehim/kaplama,
- Talaş kaldırma ve
- Biçimlendirme.

Bu yöntemlerin kuramsal modellenmesi karmaşık denklemlere dayanmaktadır ve analitik kapalı çözümlere izin vermemektedir. Sonuçta üretim işlemleri konusunda teknoloji geliştirilmesi üç kaynağa dayanmaktadır:

1. Deneysel çalışmalardan elde edilen empirik bulgular,
2. Basitleştirilmiş kuramlardan elde edilen kaba sonuçlar ve
3. Deneme-yanılma yöntemine dayalı deneyim birikimi.

Kaba sonuçlar veren basitleştirilmiş kuramların teknoloji üretimine katkısı çok sınırlıdır. Diğer iki yöntem ise çok zaman ve yüksek yatırım gerektirdikleri için özellikle gelişmekte olan ülkelerde kullanılmamaktadır. Tanımlanan çıkmazdan kurtuluş bilgisayar tabanlı sayısal yöntemlerdedir.

Tüm üretim yöntemleri içinde kuramsal yöntemlere en çok metal biçimlendirme işlemleri bağımlılık göstermektedir. Biçimlendirme işlemleri içinde en önemli yeri ise soğuk biçimlendirmeler tutmaktadır. İkinci Dünya Savaşı sırasında Almanya'nın Baden-Württemberg eyaletinde temel ilkeleri deneme-yanılma yöntemi ile bulunan soğuk biçimlendirme işlemleri 1950'li yıllardan sonra büyük bir atılım içine girmiştir. Üretilen parçaların çok iyi mekanik özelliklere sahip olması ve üretim verimliliğinin çok yüksek olması (örneğin dakikada 50 istavroz günün teknolojisi ile üretilebilmektedir) bu üretim şeklinin özellikle parça sayısı yüksek olan otomotiv ve savunma sanayilerinde kilit bir konuma getirmiştir. (Lange, 1984; Lange, 1988; Lange, 1990; Çapan, 1990).

Metal biçimlendirme işlemlerinin modellenmesine temel olan *klasik plastizite* kuramı 18. yüzyılın ortalarında oluşturulmaya başlanmış ve nihayet 19. yüzyılın ortasında kavramsal

gelişmesini tamamlamıştır, (Hill, 1985). Ancak kuramın kullanılabilirliği pratikte ancak bilgisayar tabanlı yöntemler ile mümkün olmuştur. Bu konudaki ilk çalışma Zienkiewicz *et al.* (Zienkiewicz, 1969) tarafından yapılmıştır. Genleşme büyüklükleri konusundaki kuramsal yetersizlik bu çalışmanın uygulanabilirliğini engellemiştir. Lung (Lung, 1971) ve Lee/Kobayashi (Lee,1973) rijit plastik şekil değiştirmeleri için önerdikleri sonlu eleman yöntemi ise ilk gerçek çözüme olanak tanımıştır. Rijit-plastik yöntem daha sonraki yıllarda geliştirilmeye devam edilmiştir, (Roll, 1982; Gerhardt, 1988; Rebelo, 1980; Park, 1982).

Şekil değiştirmelerde elastik bölümün ihmal edilmesi her ne kadar sayısal çözümü basitleştiriyorsa da beraberinde bazı olumsuzlukları da getirmektedir. Bu olumsuzluklardan en önemlisi elastik tabanlı esnemeler ve kalıntı gerilmelerin rijit-plastik bir yöntemle hesaplanamamasıdır. Ayrıca elastik bölgelerdeki sürtünme kuvvetleri doğal olarak doğru bulunamamaktadır. Bu nedenle Zienkiewicz *et al.* (Zienkiewicz, 1969) tarafından önerilen elastik-plastik bünye denklemlerine dayalı çözüm yöntemleri yoğun araştırmalara konu olmuş ve nihayet ilk kuramsal doğru çözüm McMeeking ve Rice (McMeeking, 1975) tarafından önerilmiştir. Elastik-plastik çözümün ortaya çıkarttığı matematiksel, sayısal ve kuramsal belirsizlikler ise asıl McMeeking ve Rice'in çalışmasından sonra görülebilmıştır. Bu belirsizliklerden bazıları bünye denklemlerinin hatasız ve tutarlı doğrusallaştırması (Simo'un çalışması (Simo, 1987) ile çözümlenmiştir), bünye denkleminin zamana göre integrasyonu (Hughes ve Winget'in (Hughes, 1980) çalışması ile çözümlenmiştir), katı cisim rotasyonları ve objektivite (Nagtegaal'in (Nagtegaal, 1981) çalışması ile çözümlenmiştir) konuları ile ilgilidir.

Sonuç olarak bugün gerek rijit-plastik ve gerekse elastik-plastik kuramlar ve sayısal çözümlerinin temel ilkeleri artık bellidir. Ancak uygulamadaki farklılıklar önerilen çözümlerin arasındaki verimlilik farkına neden olmaktadır. *Söz konusu yöntemlerin sanayide uygulanabilmesi aşaması ise daha yeni başlamıştır.* Gelişmiş ülkelerde bu konuda yürütülen beş önemli proje vardır:

1. ALPID-Projesi: 1980'li yıllarda Amerikan Hava Kuvvetleri ve NSF (National Science Foundation, ABD) tarafından desteklenen bu proje çerçevesinde Battelle Memorial Institute (Columbus, Ohio) ve Ohio State Üniversitesi ile ortaklaşa olarak iki-boyutlu, rijit-plastik bir sonlu eleman yazılımı geliştirilmiş ve takribi 50 dövme şirketinde kullanıma alınmıştır, (Altan, 1991). Kullanılan yazılımın iki boyutlu oluşu uygulanabilirliğini ciddi olarak sınırlandırmıştır. ALPID yazılımı Avrupa kıtasında DEFORM ismiyle tanınmaktadır. DEFORM son iki yıldır üç-boyutu da kapsayacak şekilde geliştirilmiştir, (Li, 1994). Ancak üç-boyutlu DEFORM

sanayide kullanılması eksik olan otomatik ağ-yenilemesi nedeniyle şimdilik hemen hemen olanaksızdır.

2. INPRO-Projesi: BMW, Daimler-Benz, Siemens ve Audi/Volkswagen şirketleri tarafından 1985 yılında bir sonlu eleman yazılımı geliştirilmesi amacıyla INPRO şirketi kurulmuştur. Bugüne dek 8.000.000,- DM harcamaya rağmen pratikte uygulanabilir somut bir yazılım ortaya çıkmamıştır. Bu başarısızlığının nedeni üniversite çevresi dışında bir araştırma/geliştirme ortamında yatmaktadır.
3. PSU-Projesi: Almanya'nın Stuttgart (üç değişik kürsü), Hannover (iki değişik kürsü), Hamburg, Dortmund ve Erlangen Üniversiteleri ile İsviçre'nin Zürih (ETH) Üniversitesi 1987 yılında başlattığı ve Volkswagen Vakfı tarafından desteklenen projenin amacı Almanca konuşan ülkelerde özgün bir metal biçimlendirme yazılımının geliştirilmesidir, (Herrmann, 1991). Bugüne dek 8.000.000,- DM dış kaynak ile desteklenen proje çok başarılı olmuştur. Mevcut benzerlerine göre modern bir mimariye sahip yeni yazılım, alman kökenli sanayiye büyük bir güç vermesi beklenmektedir. Projede toplam olarak takriben 200 adam yıllık bir çalışma yapılmıştır. Proje önerisi sahibi 1989 - 1990 yılları arasında PSU-projesinin genel koordinatörlüğünü yürütmüş ve bu dönem içinde 5.000.000,- DM'lik bir mali destek sağlamıştır.
4. DYNA2D/3D: California Üniversitesi'nin Lawrence Livermore National Laboratory'de tek bir kişi tarafından geliştirilen dinamik hareket denklemlerine dayalı (*explicit*) benzetim yazılımı şu anda dünya otomobil sanayinde çarpma testleri için kullanılan önemli bir gereç haline gelmiştir. (Hallquist, 1991). Ancak yazılımı destekleyen ekibin küçüklüğü kullanım sırasında büyük güçlükler çıkarmakta ve yazılımın gelişmeme riskini artırmaktadır.
5. FORGE2D/FORGE3D: Fransa'da Chenot ve ekibi tarafından geliştirilen FORGE2D (iki boyutlu) ve FORG3D (üç boyutlu) şu anda Avrupa metal biçimlendirme sanayisi tarafından dövme konusunda kullanılan en yaygın yazılımdır. Bazı özgün kuramsal öğeler – örneğin plastizite modellenmesinde üçgen (iki-boyutta) veya piramit (üç-boyutta) tipi elemanları kullanan yegane yazılımdır – yardımıyla son derece hızlı ve en önemlisi üçgen ve piramit tipi elemanlar sayesinde mümkün olan otomatik ağ-yenilemesi ile neredeyse tam otomatik çalışan bir yazılımdır. Ancak iki-boyutta oldukça iyi bir performans veren yeni eleman generasyonu, üç-boyutta hatalı sonuçlar verdiği bilinmektedir, (Herrmann, 1994).

6. Diğer Ticari Yazılımlar: Ticari sonlu eleman yazılımları içinde metal biçimlendirme işlemlerinin benzetimini ciddi olarak yapabilen yalnızca iki yazılım vardır: ABAQUS ve MARC. Ticari yazılımlara özgü olan birçok avantajı (örneğin: çok amaçlılık) olan bu iki yazılımın en büyük iki sakıncası, yazılımların *kapalı kutu* ve *hantal* oluşlarıdır. Bu nedenle, özellikle Türk sanayinde kullanılabilirlikleri çok sınırlıdır. Ayrıca, *End-User-Certificate* aranabileceği için satın alınan yazılımın kullanım alanlarına yabancı bir ülke hükümeti tarafından sınırlandırmalar getirilebilecektir. Ticari yazılımların hantallığından dolayı, bunların sanayinin alabileceği veya erişebileceği bilgisayar donanımları için uygun olmamasıda önemli bir dezavantaj olarak görünmektedir.

Sonlu eleman yönteminin üretim sanayisinde uygulanabilir duruma getirilmesi amacıyla yöntemin doğrusal olmayışından kaynaklanan zorlukların aşılması, yukarıda da irdenildiği gibi günümüzde uluslararası geniş araştırmalara ve çalışmalara konu olmaktadır. Bu nedenle, daha henüz *teknoloji üretimi* safhasına yeni başlayan Türk sanayisine çok önemli yardımcı bir araç olacak olan uygulanabilir bilgisayar destekli sayısal bir yöntemin geliştirilmesinin gerekliliği açıktır. Burada özellikle yöntemin doğrudan sanayide kullanımını sağlayacak olan güvenilir kullanıması, otomatik ağ-yaratma özelliği ve hızı geliştirilmesi gereken önemli olgular olarak karşımıza çıkmaktadır. Tariflenen çerçevede önerilen araştırma/geliştirme projesinin ana amacı şudur:

Projenin Ana Amacı

Üç boyutlu metal biçimlendirme işlemlerinin sayısal benzetimini sağlayacak bir sonlu eleman yazılımının geliştirilmesi. Bu yazılım projenin ileri bir safhasında talaşlı imalat işlemlerine de uygulanacaktır.

Bu ana amaca bağlı olarak iki önemli alt amaç da güdülmektedir:

Projenin Alt Amaçları

- Üretim işlemlerinin sayısal benzetimi konusunda proje yönetiminin sahip olduğu en üst seviyedeki bilgi birikiminin Türkiye’de yaygınlaştırılması.
- Türkiye’de, sanayide kullanılabilecek ilk özgün sonlu eleman yazılımının geliştirilmesi için gereken alt yapının ve bilgi birikiminin oluşturulması.

Önerilen bu projenin ilk aşaması DPT 91K121490 nolu *Sonlu Eleman Yöntemiyle Üretim İşlemlerinin Sayısal Benzetimi* adlı proje ile başlamıştır , (Tekkaya, 1993). İki-boyutlu metal biçimlendirme işlemleri için geliştirilen yazılım tamamlanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tamamlanan MODİSA-11 projesi ise bu temel çalışmaların üstüne inşa edilmiştir.

Projenin ana amacı ile alt amaçlarının tümü gerçekleştirilmiştir. Yalnızca bazı ayrıntılarda sapma olmuştur. Özet olarak proje önerisinde tanımlanan çalışma ile gerçekleştirilen çalışmaların karşılaştırılması aşağıda verilmektedir:

1. Öngörülen Hedef:

Temel Kavramlar (Plastizite Kuramı, Sonlu Eleman Çözümü, Yazılım Felsefesi)

Bu hedefe zamanında ulaşılmıştır. Proje grubu içinde yapılan çok sayıdaki seminer, kurs ve toplantı ile tüm proje elemanları öngörülen asgari bilgi seviyesine ulaşmışlardır.

2. Öngörülen Hedef:

İki Boyutlu Yazılım Kullanımı ve İncelenmesi

İki boyutlu yazılım çok süratli olarak kullanıma alındığı gibi ağ-yaratma yönteminin ilk denemeleri de bu yazılımın üzerinde yapıldı. Üç-boyutlu yazılım geliştirmeye başlandığında iki-boyutlu yazılım devre dışı bırakıldı. Ancak, son iki aydır üç-boyutlu yazılım içinde bir seçenek olarak iki-boyutlu düzlemsel genleme durumu için bir iki-boyutlu modül eklenmiş ve çok başarılı sonuçlar vermiştir.

3. Öngörülen Hedef:

Yazılım Mimarisinin Ön-Tasarımı

Zamanında tamamlanmıştır. Buradaki en kritik karar programlama dilinin seçimi olmuştur. Seçilen ANSI-C programlama dili ilk aşamalarda bazı sancılar yarattıysada projenin ilerleyen aşamalarında bu kararın ne denli isabetli olduğu anlaşılmıştır. Yapılacak benzeri çalışmalarda da ANSI-C dilinin kullanılması ısrarla önerilmektedir.

4. Öngörülen Hedef:

Veri-Tabanı Tasarımı

İlk aşamada alman kaynaklı PSU-veri-tabanının kullanılması düşünülürken, kullanım yaratığı aşırı ek yükler nedeniyle bundan vazgeçilmiştir. Şu anda kullanılan veri mimarisi tamamıyla C-dilindeki *pointer* kavramına dayalı bir yapıdadır. Maalesef çok profesyonel olmayan bu gelişmeyi proje çalışmaları sırasında önle-

mek mümkün olamadı. Karşılaşılan ikilem profesyonel sistematik bir veri tabanı geliştirilmesi ve buna karşılık genç araştırmacıların programlama şevkini kırmak idi. Genç araştırmacıların programlama şevkininin kırılmasına neden olacak hertürlü gelişmeden bu projede kaçınılmıştır. Bu zor karara rağmen sevindirici bir gelişme ise projenin son 6 hatta 8 ayında proje elemanlarının kendi iradeleri ile böyle modern bir veri tabanına gereksinim duyulduğunu beyan etmeleri olmuştur.

5. Öngörülen Hedef:

Üç-Boyutta Temel Denklemler, Yöntem ve Kodlama

Bu hedefe temel kavramların ve sonlu eleman sayısal çözümü elde edilmesinden hemen sonra başlanılmış ve çok kısa bir süre içinde tamamlanmıştır.

6. Öngörülen Hedef:

Üç-Boyutlu Temas Yöntemi, Tasarımı ve Kodlama

Daha önceki DPT-projesi (DPT91K121490) çerçevesinde geliştirilen özgün iki-boyutlu temas algoritması üç-boyutlu olarak geliştirilmiştir. Üç-boyutta gerekli olan temas bölgelerinin *akıllı* tahmini için harcanan çabalar ise sonuç vermemiştir. Bunun temel nedeni projenin bu kısmını yürüten araştırma elemanının gereğinden fazla ANSI-C dilinin inceliklerine inmeye ve bu oldukça ileri olan dil yapılarını kullanmaya çalışması neden olmuştur. Projenin bu hedefine ulaşılmış olmasına rağmen yukarıda sözü edilen olumsuzluk olmasaydı bugün çok daha ileri bir seviyeye hem kuramsal hem de uygulama olarak gelinebilirdi.

7. Öngörülen Hedef:

Termomekanik Kenetlenmenin Kuramı, Sayısal Yöntem ve Kodlama

Termomekanik kenetlenme projenin ilk döneminde TÜBİTAK tarafından izlenen para politikası nedeniyle çalışmalara katılmayı son anda red eden çok değerli bir araştırma elemanı nedeniyle askıya alınmıştı. Bu nedenle zorunlu olarak uzun süre göz ardı edilen bu hedef ancak yeni bir araştırma elemanının projeye ve bu konuya ilgi göstermesi ile aktive edilmiştir. Şu anda termomekanik kenetleme kuramı tamamlanmış ve sonlu eleman yazılımının içine konmuştur. Yapılan ilk denemeler çok başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak eksik olan bazı sınır şartlarının tamamlanması ve özellikle kalıpların da sonlu elemanlar ile modellenmesi en az bir yıllık bir ek-çalışma ile mümkün olduğu anlaşılmıştır. Buna rağmen tamamıyla askıya alınan bu hedef ile ilgili yine de bu denli bir ilerlemenin sağlanması sevindiricidir.

8. Öngörülen Hedef:

Grafik Veri Hazırlama ve Sonuç Değerlendirmesi için Ara-Yazılım

Grafik veri hazırlama ve grafik sonuç değerlendirme için ticari bir yazılım olan ASKAMesh/View seçilmiştir. Bu proje çerçevesinde geliştirilen sonlu eleman yazılımının bu ticari yazılım ile iletişim içinde bulunabilmesi ise geliştirilen ANSI-C fonksiyonları ile çok profesyonelce sağlanmıştır. Böylece geliştirilen yazılım aslında çok kolayca herhangi başka bir grafik veri hazırlama ve sonuç değerlendirme yazılımıyla (örneğin PATRAN, IDEAS, MENTAT, vs.) iletişim kurması sağlanabilir.

9. Öngörülen Hedef:

Yeniden Ağ Oluşturma Yöntemi ve Kodlama

Projenin en başarıya ulaştığı hedef yeniden ağ-yaratma konusunda olmuştur. Burada aslında tam bir otomatik ağ-yaratma hedeflenmezken, bu konuda çalışan araştırma elemanının inadı ve yeteneği sayesinde tam otomatik bir yöntem geliştirilmiştir. Bu sayede, elde edilen yöntem şu anda dünyada üç-boyutlu metal biçimlendirme işlemlerinin tam otomatik olarak sayısal benzetimini yapabilen iki bilinen çözümden biridir.

10. Öngörülen Hedef:

Yetmezlik Kriterleri

Bu hedef konusunda sonlu elemanların kalitesinin tesbiti dışında bir çalışma yukarıda belirtilen personel darboğazı nedeniyle yapılmamıştır. Ancak söz konusu hedef önceliği olan bir konu olmadığı için projenin bitiminden sonra yazılıma basit bir fonksiyon bazında eklenebilir.

11. Öngörülen Hedef:

Talaşlı İmalat Analizi

Personel yetersizliği nedeniyle tümüyle askıya alınan bu hedef konusunda son iki yıldır proje ekibine katılmayan bir doktora öğrencisi tarafından çalışmalar yapılmakta ve en son gelinen aşamada talaşın ayrılması yani kopması simule edilmeye başlanmıştır. Ancak çalışmalar proje dışında geliştiği için yeterince hızlı olmamakta ve verimi düşük kalmaktadır.

12. Öngörülen Hedef:

Sayısal Denemeler/Kontroller

Projenin ilk aşamalarında temel formulasyonu sınamak üzere çözümü bilinen problemler simule edilmiştir. Elde edilen mükemmel uyum geliştirilen yazılımın doğru ve güvenilir çalıştığını kanıtlamaktadır. Ayrıca gerçek sanayi problemlerinden yararlanılarak uygulama örnekleri çözülmüştür. Burada da başarılı sonuçlar bu-

lanmış ve geliştirilen yazılımın somut ve karmaşık sanayi uygulamalarında kullanılabilirliğini gösterilmiştir.

13. Öngörülen Hedef:

Üç-Boyutlu Yazılım Versiyonu

Projenin ana amacı olan bu hedefe tümüyle ulaşılmıştır. Geliştirilen yazılıma PLADAN, yani *PLAstik Deformasyon ANalizi* adı verilmiştir. PLADAN'nın toplam yedi sürüm nesli oluşmuştur: α , β , 1, 2, 3, 4 ve nihayet en son 5. sürümü ortaya çıkarılmıştır. Bu son sürüm ile ilgili geniş bilgiler bundan sonraki bölümlerde verilmektedir. Ara sürümler ile ilgili bilgiler çeşitli ara-raporlarda ayrıntılı olarak verilmiştir.

Raporun diğer bölümlerinde önce kuramsal temeller (Bölüm 2) ve sayısal formülasyon (Bölüm 3) verilecektir. Daha sonra otomatik ağ-yenileme yöntemi tanıtılacaktır, Bölüm 4. Temas yöntemi kısa Bölüm 5'da özetlenecektir. Bölüm 6 PLADAN'ın doğruluğunu sınamak için yapılan ilk karşılaştırma hesaplarını içermektedir. Sanayi uygulama örnekleri Bölüm 7'de tanıtılarak, PLADAN'ın simülasyon gücü hakkında bir fikir verilecektir. Son bölümde ise sonuçlar ve ileriye dönük öneriler tartışılmaktadır. Raporun ekinde ise uygulama özeti takdim edilmektedir.

2 KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde önce kullanılan bünye denklemleri tanıtıldıktan sonra plastik deformasyonları tarifleyen varyasyon ilkesi verilecektir. Kuramsal temel denklemlerin sayısal çözümü ise Bölüm 3'da verilecektir.

2.1 Bünye Denklemleri

Malzemenin plastik deformasyonu Lévy-Mises bünye denklemleri, (Hill, 1985; Ismar, 1979; Kachanov, 1974; Malvern, 1969), ile tariflenmektedir. Bu model elastik genlemeleri ihmal etmekte ve üç bölümden oluşmaktadır:

Lévy-Mises *akma kuralı* deviatorik Cauchy gerilme tansörü \mathbf{T}' ile genleme hızları tansörü \mathbf{D} arasındaki bağlantıyı sağlar:

$$\mathbf{T}' = \frac{2}{3} \frac{k_f}{\dot{\phi}} \mathbf{D}. \quad (1)$$

Burada k_f aktuel akma gerilmesidir ve $\dot{\varphi}$ eşdeğer genleme hızıdır:

$$\dot{\varphi} = \sqrt{\frac{2}{3}(\mathbf{D} : \mathbf{D})}. \quad (2)$$

$\dot{\varphi}$ genleme ölçüsü olmaktan ziyade malzemenin bir iç (veya bünye) parametresi olarak anlaşılmasında yarar vardır. Bu parametrenin zamana göre integrali ise

$$\varphi = \int_0^t \dot{\varphi} dt \quad (3)$$

eşdeğer genleme veya *şekillendirme şiddeti* olarak adlandırılır.

Denklem (1) yalnızca akma kriteri sağlandığı sürece geçerlidir, yani:

$$\bar{\sigma}(\mathbf{T}') = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{T}' : \mathbf{T}')} = k_f \quad (4)$$

olduğu sürece. Burada $\bar{\sigma}$, v. Mises eşdeğer gerilmesidir. Denklem (4) sağlanmazsa, yani

$$\bar{\sigma}(\mathbf{T}') < k_f, \quad (5)$$

olursa, Lévy-Mises akma kuralı belirsiz bir \mathbf{T}' verir ve $\mathbf{D} = 0$ olur. Böylece rijit durumlar için gerilme değerleri bulunamaz ve bu gerçek çözüm yönteminde bazı zorluklara neden olur.

Denklem (1) hacim sabitliğini

$$\mathbf{I} : \mathbf{D} = 0, \quad (6)$$

ve

$$\mathbf{D}^{elastik} = 0, \quad (7)$$

olduğunu ön-şart olarak kabul ettiğine dikkat edilmelidir.

Lévy-Mises akma kuralı aslında ideal-plastik bir malzeme için geçerli olmasına rağmen, sayısal benzetimlerde pekleşen malzemeler için de kullanılabilir. Ancak burada yapılması gereken denklem (1)'in şekillenme süreci boyunca *akma eğrisi*

$$k_f = k_f(\varphi) \quad (8)$$

yardımıyla güncelleştirilmesidir.

2.2 Varyasyon İlkesi

Rijit-plastik bir cisim için şu varyasyon ilkesi¹ geçerlidir:

$$\Pi = \int_V \mathbf{T} : \mathbf{D} dV - \int_{A_t} \mathbf{t} \bullet \mathbf{v} dA \implies \text{minimum}. \quad (9)$$

¹Hertürlü kütle kuvvetleri ihmal edilmiştir.

Burada V cismin hacmini, \mathbf{T} Cauchy gerilme tansörü, \mathbf{D} genleme hızları tansörü, \mathbf{t} gerilme vektörü, \mathbf{v} hız vektörü ve nihayet A_t gerilme vektörüne maruz kalan cismin dış yüzeyidir. Von Mises akma şartı, plastik iş hipotezi ve tüm cismin plastik olarak aktığının varsayılması ile denklem (9)

$$\Pi = \int_V k_f \dot{\varphi} dV - \int_{A_t} \mathbf{t} \bullet \mathbf{v} dA \implies \text{minimum} \quad (10)$$

şeklini alır, (Markov, 1947).

Ne yazık ki denklem (10) bu haliyle sonlu eleman yöntemindeki katılık matrisinin elde edilmesinde kullanılamaz. Çözüm, ancak sıkışmazlık şartı fonksiyonele bir yan şart olarak ilave edilirse mümkün kılınabilir, (Roll, 1982; Lung, 1971):

$$\bar{\Pi} = \int_V k_f \dot{\varphi} dV + \int_V \lambda D_V dV - \int_{A_f} \mathbf{t} \bullet \mathbf{v} dA \implies \text{kararlı.} \quad (11)$$

Bağımsız bir parametre olan λ , Lagrange çarpanıdır ve

$$D_V = \mathbf{I} : \mathbf{D} \quad (12)$$

hacim değişim hızıdır. Dikkat edilmesi gereken husus, artık sıkışmazlığın yalnızca yaklaşık olarak sağlandığıdır. Lagrange çarpanı yöntemine alternatif olarak, denklem (6) ile verilen yan şart, fonksiyonele bir ceza fonksiyonu ile de ilave edilebilir:

$$\tilde{\Pi} = \int_V k_f \dot{\varphi} dV + \int_V \frac{S}{2} D_V^2 dV - \int_{A_t} \mathbf{t} \bullet \mathbf{v} dA \implies \text{kararlı.} \quad (13)$$

Burada yeterince büyük bir rakam olan S sabit bir ceza faktörüdür.

Lagrange parametresi λ fiziksel olarak hidrostatik gerilme T_H ile eşleştirilebilir:

$$\lambda = T_H = \frac{1}{3}(\mathbf{I} : \mathbf{T}). \quad (14)$$

(11) numaralı ekstremal denklem aynı zamanda şöyle de ifade edilebilir:

$$\delta \bar{\Pi} = \int_V k_f \delta \dot{\varphi} dV + \int_V \lambda \delta D_V dV + \int_V D_V \delta \lambda dV - \int_{A_t} \mathbf{t} \bullet \delta \mathbf{v} dA = 0. \quad (15)$$

Burada δ , \mathbf{v} 'nin veya λ 'nın keyfi değişimidir. Analog olarak, denklem (13)

$$\delta \tilde{\Pi} = \int_V k_f \delta \dot{\varphi} + S \int_V D_V \delta D_V dV - \int_{A_t} \mathbf{t} \bullet \delta \mathbf{v} dA = 0 \quad (16)$$

olarak ifade edilebilir.

3 SAYISAL ÇÖZÜM

Varyasyon probleminin çözümü önce denklem (16) yardımıyla oluşturulacaktır. Denklem (16), zincir kuralını da kullanarak şöyle de yazılabilir:

$$\delta\tilde{\Pi}(\mathbf{v}) = \frac{\partial\tilde{\Pi}}{\partial\mathbf{v}} \delta\mathbf{v} = 0. \quad (17)$$

$\delta\mathbf{v}$ keyfi olduğu için

$$\frac{\partial\tilde{\Pi}(\mathbf{v})}{\partial\mathbf{v}} = 0 \quad (18)$$

geçerlidir. Ayrıklaştırma için bir eleman tipine karar verildiği varsayılırsa, eleman seviyesinde fonksiyonel $\tilde{\Pi}$ şu şekilde ayrıklaştırılabilir:

$$\begin{aligned} \tilde{\Pi}^{[e]}(\mathbf{v}) \approx \tilde{\Pi}^{[e]}(\{v\}) &= \int_{V^{[e]}} k_f \sqrt{\frac{2}{3} \{v\}^{[e]T} [B]^T [B] \{v\}^{[e]} dV} + \\ &+ \frac{S}{2} \int_{V^{[e]}} (\{c\}^T [B] \{v\}^{[e]})^2 dV - \int_{A_t^{[e]}} \left\{ \begin{array}{c} t_x \\ t_y \\ t_z \end{array} \right\}^T [N] \{v\}^{[e]} dA. \end{aligned} \quad (19)$$

Burada $[N]$ elemanın interpolasyon fonksiyonu matrisini ifade eder:

$$\left\{ \begin{array}{c} v_x \\ v_y \\ v_z \end{array} \right\} = [N] \{v\}^{[e]}. \quad (20)$$

$[v_x \ v_y \ v_z]$, \mathbf{v} 'nin komponentlerini eleman $[e]$ içindeki herhangi bir yer için gösterir, ve $\{v\}^{[e]}$ eleman düğüm noktaları hızlarıdır. $[B]$ ise \mathbf{D} ile $\{v\}^{[e]}$ arasındaki geçiş matrisidir:

$$\{D\} = [B] \{v\}^{[e]}. \quad (21)$$

Son olarak $\{c\}$ bir birleştirme vektörüdür:

$$D_V = \{c\}^T \{D\}. \quad (22)$$

Denklem (18)'in denklem (19)'a uygulanması ile

$$\begin{aligned} \frac{\partial\tilde{\Pi}^{[e]}(\{v\})}{\partial\mathbf{v}} \approx \frac{\partial\tilde{\Pi}^{[e]}(\{v\})}{\partial\{v\}^{[e]}} &= \int_{V^{[e]}} \frac{2}{3} \frac{k_f}{\sqrt{\frac{2}{3} \{v\}^{[e]T} [B]^T [B] \{v\}^{[e]}}} [B]^T [B] \{v\}^{[e]} dV + \\ &+ S \int_{V^{[e]}} [B]^T \{c\} \{c\}^T [B] \{v\}^{[e]} dV - \\ &- \int_{A_t^{[e]}} [N]^T \left\{ \begin{array}{c} t_x \\ t_y \\ t_z \end{array} \right\} dA. \end{aligned} \quad (23)$$

elde edilir. Denklem (23) kompakt şekilde şöyle de yazılabilir:

$$([K_D]^{[e]} + [K_H]^{[e]}) \{v\}^{[e]} = \{f\}^{[e]}, \quad (24)$$

ve

$$[K_D]^{[e]} = \int_{V^{[e]}} \frac{2}{3} \frac{k_f}{\sqrt{\frac{2}{3} \{v\}^{[e]T} [B]^T [B] \{v\}^{[e]}}} [B]^T [B] dV, \quad (25)$$

$$[K_H]^{[e]} = S \int_{V^{[e]}} [B]^T \{c\} \{c\}^T [B] dV, \quad (26)$$

$$\{f\}^{[e]} = \int_{A_t^{[e]}} [N]^T \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{Bmatrix} dA. \quad (27)$$

Sayısal integral işlemlerinde deviatorik integraller tam, hidrostatik integraller ise eksik mertebeler ile hesaplanmalıdır (Nagtegaal, 1981).

Eleman katılık matrisleri bilinen yöntemlerle (örneğin: Desai,1972; Gallagher, 1975; Huebener, 1982) global katılık matrisi çerçevesinde birleştirilir:

$$[K_s(\{v\})] \{v\} = \{F\}. \quad (28)$$

Elde edilen denklemlerin düğüm noktaları cinsinden doğrusal olmadığı açıktır ($[K_s]$ matrisi $\{v\}$ 'e bağlıdır).

Ortaya çıkan doğrusal olmayan denklemler kümesinin çözümü için ilk başlangıç hızını tahmin etmek gerekmektedir. Çeşitli yöntemler içinden bu çalışmada doğrudan yenileme yöntemi (*direct iteration method*) seçilmiştir (Ramm, 1976). Yöntem şöyle ifade edilebilir:

$$[K_s(\{v\}^{(n)})] \{v^{(n+1)}\} = \{F\}, \quad (29)$$

Burada n yenileme döngüsü sayısıdır. Yenileme şu şartlar sağlandığında durdurulur:

$$\left| \frac{\|\{v\}^{(n+1)} - \{v\}^{(n)}\|}{\|\{v\}^{(n+1)}\|} \right| < \epsilon \quad (30)$$

ϵ , 10^{-4} ile 10^{-2} arasında olan bir yakınsama sınırıdır. $\|\{v\}^n\|$ ise $\{v\}$ vektörünün Euler normudur.

Bu şekilde elde edilen kaba hız çözümü, Newton yöntemine ilk hız tahmini olarak verilir ve nihai çözüm bu yöntemle elde edilir. Denklem (28) doğrusallaştırıldıktan sonra, teğetsel katılık matrisi elde edilir. Bu matrisin yardımıyla da hız değişim vektörü $\{\Delta v\}$

hesaplanır. Doğrusallaştırma, denklem (18)'in tahmin edilen bir hız alanı $\{v\}^{(n)}$ etrafında Taylor dizisi açılımının yapılması ile bulunur:

$$\left. \frac{\partial \tilde{\Pi}^{[e]}}{\partial \{v\}^{[e]}} \right|_{\{v\}^{(n)}} + \left. \frac{\partial}{\partial \{v\}^{[e]}} \left(\frac{\delta \tilde{\Pi}^{[e]}}{\delta \{v\}^{[e]}} \right) \right|_{\{v\}^{(n)}} \{\Delta v^{(n+1)}\}^{[e]} \approx 0 \quad (31)$$

burada

$$\{\Delta v^{(n+1)}\}^{[e]} = \{v\}^{(n+1)} - \{v\}^{(n)} \quad (32)$$

hız düzeltmeleridir. n 'ci yenileme adımı için denklem (31)'deki ilk terim, $\{v^{(n)}\}^{[e]}$ için bulunan denklem (23)'e tekabül eder. Denklem (31)'deki ikinci terimi ise şöyle bulunabilir:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \{v\}^{[e]}} \left(\frac{\partial \tilde{\Pi}^{[e]}}{\partial \{v\}^{[e]}} \right) \right|_{\{v\}^{(n)}} = [K_{DD}] + [K_{HH}] \quad (33)$$

burada

$$[K_{DD}]^{[e]} = \int_{v^{[e]}} \frac{2}{3} \frac{k_f}{\dot{\varphi}^{(n)}} \left([B]^T [B] - \frac{[B]^T [B] \{v^{(n)}\}^{[e]} ([B]^T [B] \{v^{(n)}\}^T)}{\{v^{(n)}\}^{[e]T} [B]^T [B] \{v^{(n)}\}} \right) dV \quad (34)$$

ve

$$[K_{HH}]^{[e]} = S \int_{V^{[e]}} [B]^T \{c\} \{c\}^T [B] dV. \quad (35)$$

Böylece eleman katılık özellikleri elde edilir:

$$[K_T(\{v\}^{(n)})]^{[e]} \{\Delta v\}^{(n+1)[e]} = \{r\}^{(n)[e]}. \quad (36)$$

Buradaki teğetsel katılık matrisi

$$[K_T(\{v^{(n)}\})]^{[e]} = [K_{DD}(\{v^{(n)}\})] + [K_{HH}] \quad (37)$$

olarak ifade edilirken, *denge dışı kuvvetler*, yani *dış* ve *iç* kuvvetlerin farkı şu şekilde bulunur:

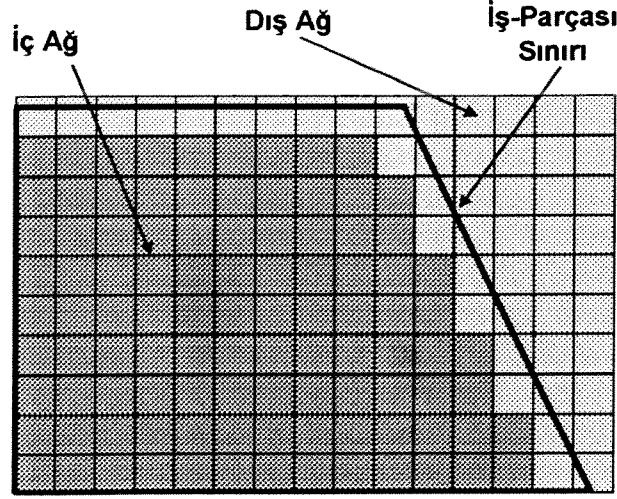
$$\{r\}^{(n)[e]} = \{f\} - \int_{V^{[e]}} [B]^T \{T\} dV. \quad (38)$$

Burada $\{T\}$ Cauchy gerilme tansörünün elemanlarını içeren vektördür.

4 AĞ-YENİLEME YÖNTEMİ

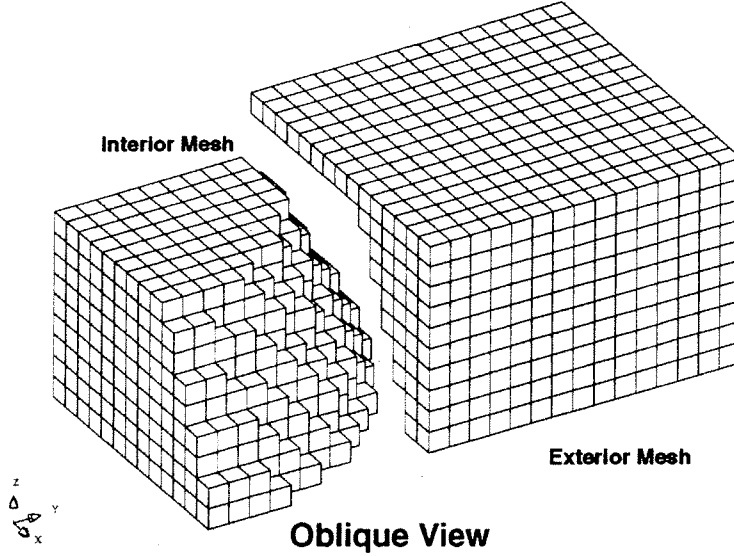
4.1 Temel Yaklaşım

Otomatik ağ yenileme yöntemi son derece basit bir fikir üzerine kurulmuştur (Kavaklı, 1995): Tüm iş-parçasını çevreleyen ve kolaylıkla elde edilen yapısal bir eleman ağı modifiye edilmektedir. Bu ilk yapısal ağ dikkörtgen ve prisma gibi ilkel bloklardan oluşabilir.



Simetri Yüzeyi Görünüşü

Şekil 1: İç ve dış ağların tanımı: iki-boyutlu görüntü

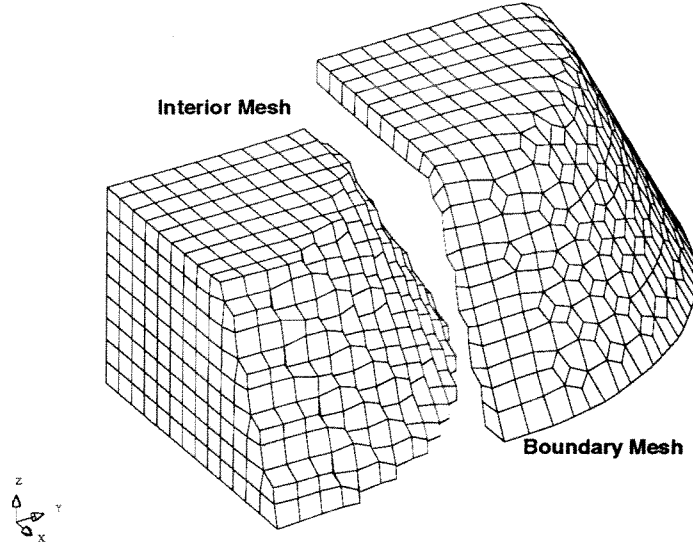


Şekil 2: İç ve dış ağların tanımı: üç-boyutlu görüntü

Son ağ ise bu ilk ağın düzeltilmesi ile elde edilir. Düzeltmeler elemanların atılması, elemanların eklenmesi ve nihayet düğüm noktalarının yerlerinin değiştirilmesi ile elde edilir. İlk adım olarak yapısal ağın iş-parçasının yüzeyini kesen elemanlarının bulunması gerekmektedir. Bu fikir Şekil 1'de üstü kesilmiş bir honi ile gösterilmektedir. İş-parçasının içinde kalan ağ, yani *iç-ağ*, iş-parçasının yüzeyini kesen veya dışında kalan ağ ise *dış ağ* olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 2 ise bu kavramları üç-boyutlu bir bakış açısından görüntülemektedir.

Düzenli iç-ağ, dış elemanların atılması ile bulunur. Sınır ağı ise, yani iç-ağ ile iş-parçasının yüzeyi arasında kalan bölgede bulunan düzensiz ağ ise iç-ağ yüzeyinin iş-parçasının yüzeyine projeksiyonu ile bulunur. Şekil 3, Şekil 1'de gösterilen düzenli iç-



Şekil 3: İç ve sınır ağların tanımı: üç-boyutlu görüntü

ağdan hareket edilerek elde edilen sınır ağı göstermektedir.

Ağ-yenileme yönteminin en önemli girdisi yeni ağda olması gereken ortalama eleman büyüklüğüdür. Şayet bu büyüklük verilmemiş ise sekiz düğüm noktalı elemanlar için otomatik olarak bulunan değer şudur:

$$S_{ave} = \frac{1}{M} \sum_{e=1}^M \left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 L_i^e \right) \quad (39)$$

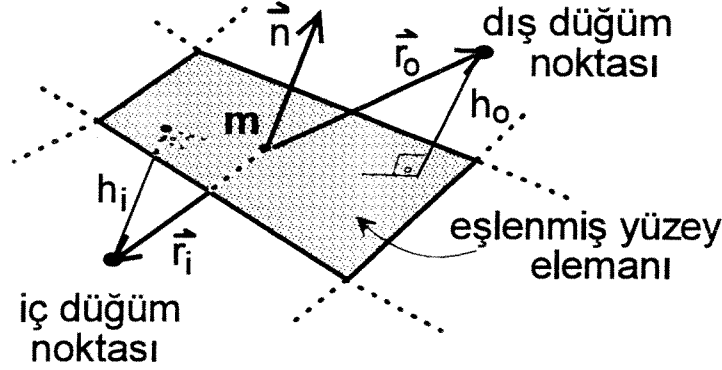
Yukarıda M eski ağdaki toplam eleman sayısı. L_i^e ise e nci elemanın i nci kenar uzunluğudur.

Burada tanıtılan temel yaklaşım ilk defa (Schneiders, 1992)'de ortaya atılmıştır. Ancak yöntemin gerçekten otomatik uygulanabilmesi için gerekli geliştirmeler bu proje çerçevesinde geliştirilmiştir. Bu nedenle, kullanılan yöntem özgündür. Bundan sonraki bölümlerde özet olarak iç-ağın elde edilmesi, sınır ağının elde edilmesi ve iş-parçasının kenar ve köşelerinin kaybedilmemesi için gereken önlemlerden bahsedilecektir.

4.2 Dış-Ağın Ayrılması

İç-ağ dış elemanların atılması ile elde edilir. Dış elemanlar ise en az bir dış düğüm noktası olan elemanlardır. Dış düğüm noktaları ise Şekil 4'de gösterildiği gibi bulunmaktadır. Bir düğüm noktasının dış nokta olarak tanımlanması için

$$\vec{r} \bullet \vec{n} < h_{lim} \quad (40)$$



Şekil 4: İç ve dış düğüm noktalarının tanımı

sağlanması gerekmektedir. Burada \vec{n} , iş-parçasının söz konusu düğüm noktasına en yakın olan yüzey segmanının dışa gösteren normal vektörü, \vec{r} düğüm noktasıyla bu segmanın merkezi arasında olan pozisyon vektörü, h_{lim} ise sınır ağının kalınlığının başta tanımlanan ortalama eleman büyüklüğünden küçük olmamasını sağlayacak bir ölçüdür. Normal şartlarda

$$h_{lim} = S_{ave}/2 \quad (41)$$

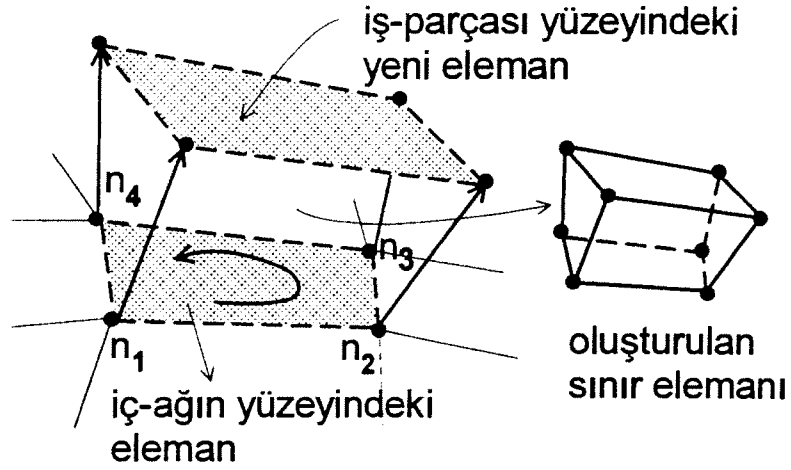
olarak alınmalıdır.

4.3 Sınır Ağın Oluşturulması

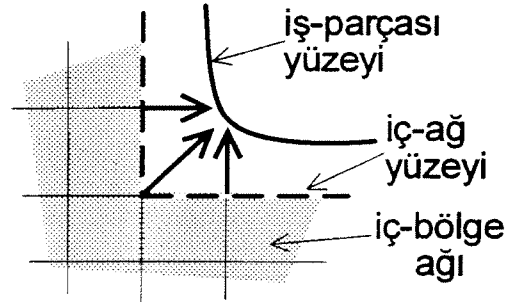
Sınır ağı, iç-ağın yüzeylerinin iş-parçasına projeksiyonu ile elde edilir. Bu şekilde yüzeydeki dörtgen bir elemandan üç-boyutlu sekiz düğüm noktalı elemanlar elde edilir, Şekil 5.

Projeksiyon vektörünün, \vec{p} , standard değeri söz konusu düğüm noktasını çevreleyen iç-ağın yüzey elemanlarının normallerinin ortalaması olarak bulunur. Bu şekilde bulunan projeksiyonlar genelde olumlu sonuç verirken, iç-ağın merdiven şeklinde olduğu bölümlerde ve iş-parçasının iç-büküye olduğu bölgelerde sorunlar yaratmaktadır, Şekil 6. Bu problemi aşabilmek için üç değişik modifikasyon yapılmaktadır:

- İç-ağın yüzeyindeki elemanların düğüm noktaları komşu elemanların merkezlerinin ortalamasına kaydırılması ile köşeler yumuşaltılmaktadır.
- Projeksiyon yönlerinin komşu projeksiyonların ortalamasına yaklaştırılması ile ayrıca bir gevşeme elde edilmektedir.



Şekil 5: Projeksiyon ile elde edilen tipik bir sınır elemanı



Şekil 6: İç-bükey köşelerde projeksiyon problemi

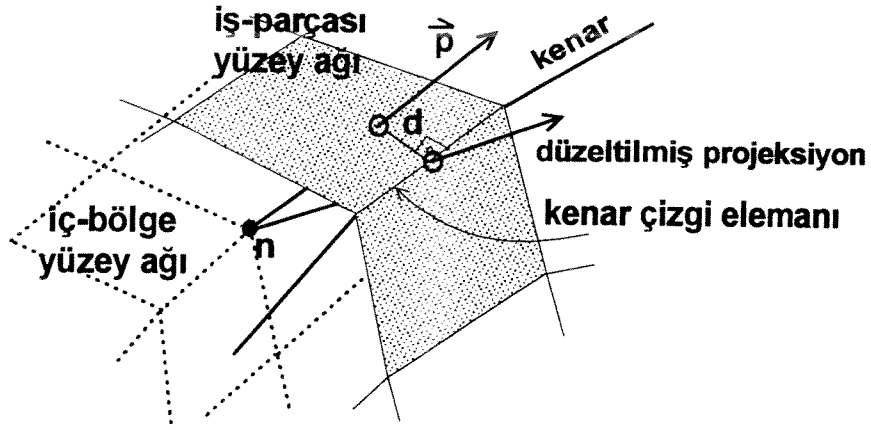
- Sınır-ağ kalınlığının sabitleştirilmesi.

$$\vec{R}_{yeni} = \vec{R}_{eski} + \frac{d - S_{ave}}{2} \cdot \vec{p} \quad (42)$$

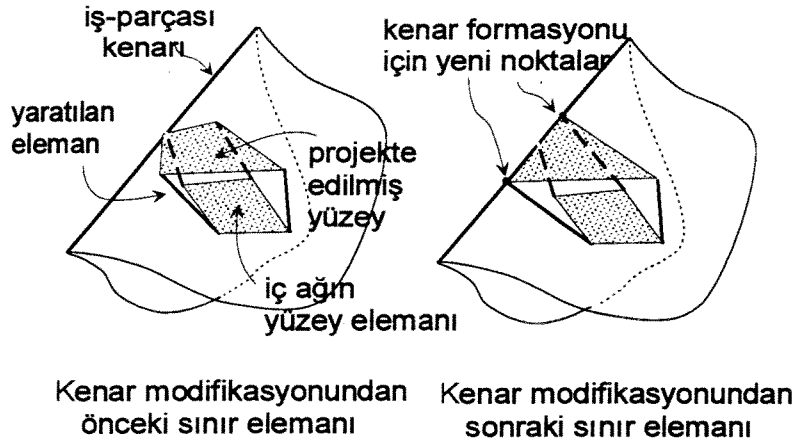
Burada, \vec{R} düğüm noktalarının pozisyon vektörüdür.

4.4 Kenar ve Köşelerin Oluşturulması

İş-parçasının orijinal kenar ve köşelerinin yeni ağ tarafından da tanımlanabilmesi için projeksiyon yönlerinin bu kritik bölgelerde dikkatle düzeltilmesi gerekmektedir. Örneğin, bir kenara yakın bir düğüm noktasının projeksiyonu ele alınsın, Şekil 7. Burada yapılan işlem



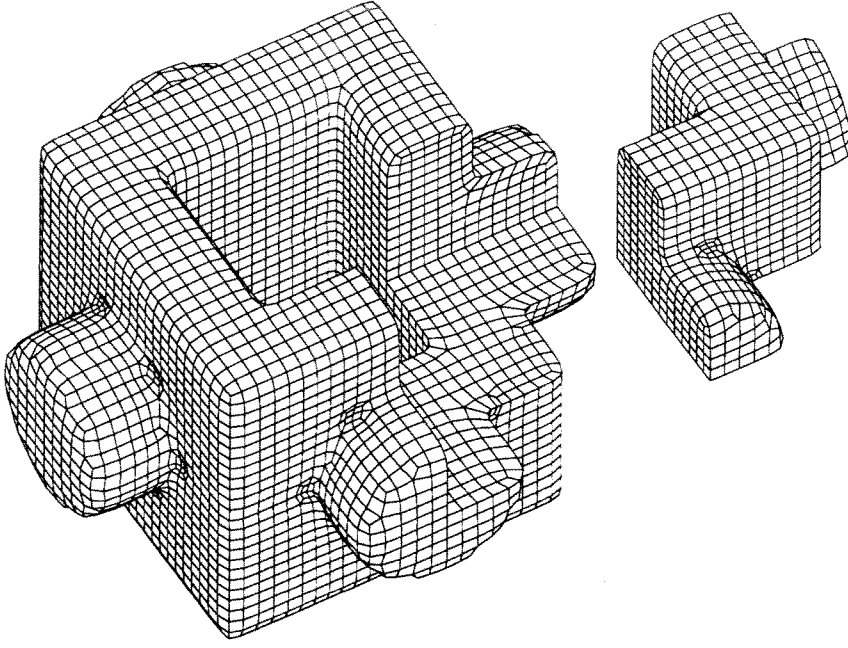
Şekil 7: Kenarlarda projeksiyon



Şekil 8: Kenarlarda oluşan bozuk sınır elemanları

eğer d mesafesi bir sınır değerinin altındaysa projeksiyonun şekilde de görüldüğü gibi kenarın üstüne gelecek şekilde düzeltilmesidir. Kullanılan sınır mesafesi genellikle ortalama eleman büyüklüğünün % 20'si kadardır.

Yukarıda belirtilen yöntemlerle yapılan kenar ve köşe düzeltmeleri sonucunda bu mevkiilerde Şekil 8'de gösterildiği gibi bozuk sınır elemanları oluşmaktadır. Bu problemin giderilmesi için yapılan işlem, bu şekildeki elemanların deviatorik katılık matrislerinin de indirgenmiş olarak sayısal entegrasyonunun yapılmasıdır.



Şekil 9: Otomatik ağ oluşturma uygulamaları

4.5 Kısmi Ağ Yenileme

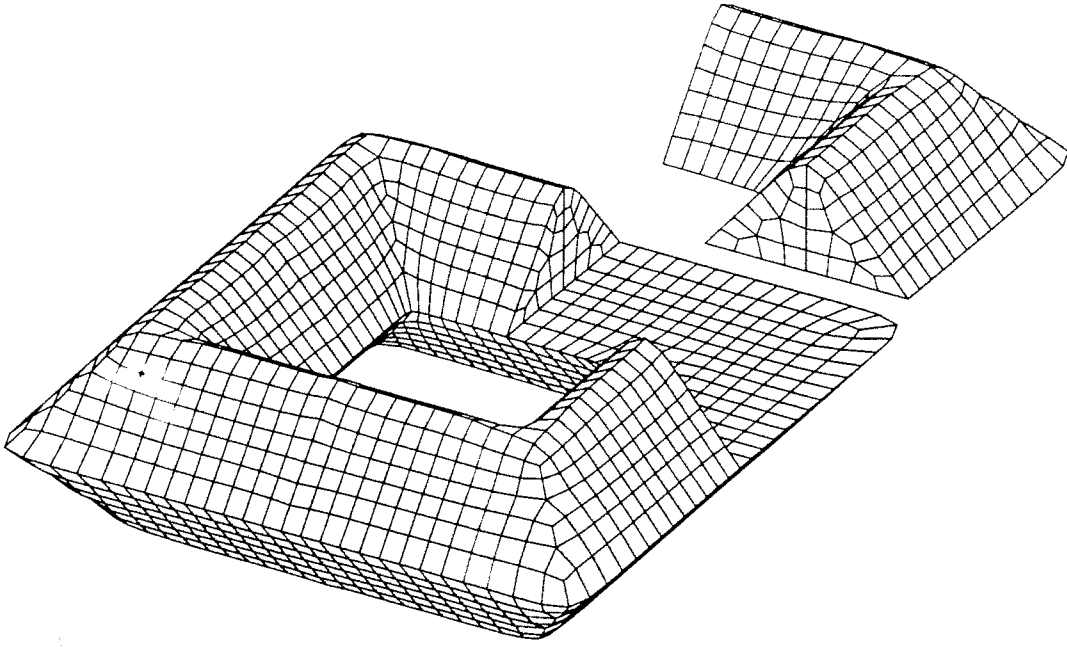
Bir çok metal biçimlendirme uygulamasında ilk önce sınır bölgelerindeki elemanlar bozulmakta ve iç-bölgelerdeki elemanlar ise sağlam kalmaktadır. Bu nedenle, bu proje çerçevesinde bir de *Kısmi Ağ Yenilemesi* diye adlandırılan bir yöntem geliştirilmiştir. Buna göre, yukarıda bahsedilen basit yapısal ağın yerine bozulmamış ama yine de deforme olmuş olan orijinal ağ alınmakta ve yalnızca bozulmuş olan sınır elemanlar atıldıktan sonra bunların yerine yepyeni bir sınır ağı tabakası eklenmektedir. Bu yöntem çok hızlı ve sağlıklı çalıştığı gözlemlenmiştir. Kısmi ağ yenilemenin ancak iç kısımlardaki ağın kalitesinin el verdiği sürece yapılabileceği açıktır.

4.6 Otomatik Ağ-Yaratma Uygulamaları

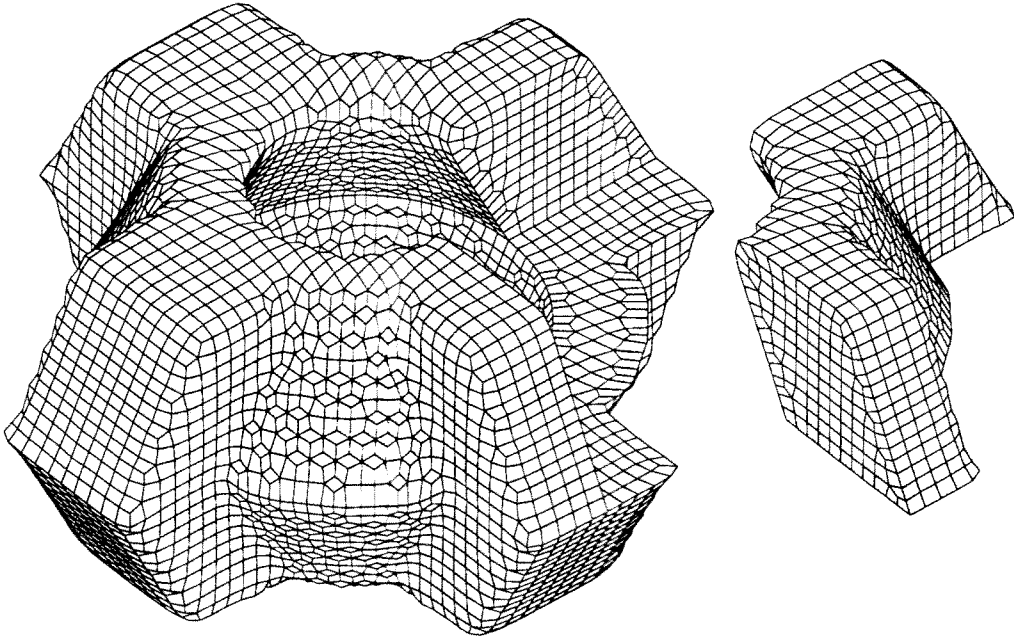
Otomatik ağ-yaratma yöntemiyle yapılan karmaşık uygulama örnekleri Şekil 9, 10 ve 11'da verilmiştir.

5 TEMAS MODELİ

Metaller kalıpların teması ile biçimlendirilirler. Bu nedenle sayısal benzetimin gerçekliği doğrudan iş-parçası ile kalıpların arasındaki temasın modellenmesindeki kalitesine



Şekil 10: Otomatik ağ oluşturma uygulamaları



Şekil 11: Otomatik ağ oluşturma uygulamaları

bağımlıdır. Ayrıca, temas algoritmasının hızı tüm simülasyonun hızını etkilemektedir. Bu proje çerçevesinde, Euler zaman entegrasyonu ile uyumlu olan doğrusal bir temas algoritması seçilmiştir.

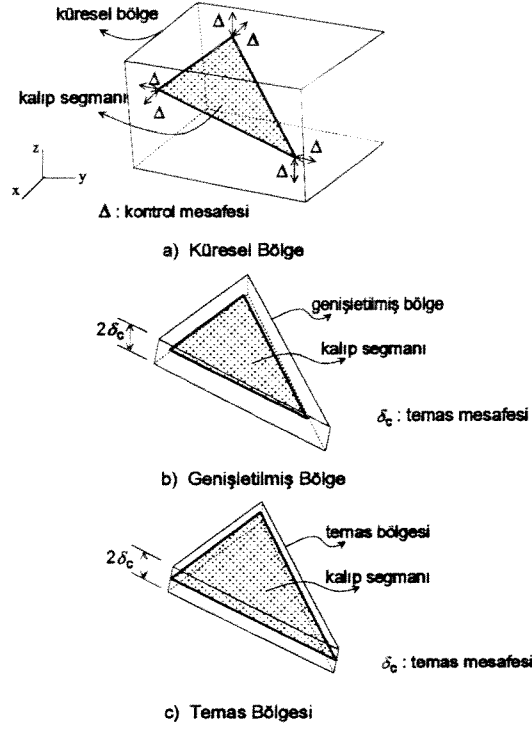
Temas durumunu tesbit edebilmek için, tüm temas sistemi hiyerarşik bir yapıda incelenmiştir (Zhong, 1990; Tekkaya, 1992):

- temas cisimleri
- temas yüzeyleri
- temas segmanları
- temas noktaları

Geliştirilen sayısal benzetim sisteminde temas cisimleri rijit kalıplardan ve rijit-plastic iş-parçasından oluşmaktadırlar. Temas yüzeyleri bu cisimleri çevrelemektedir. Temas segmanları üçgen veya dörtgen fazetlerden oluşmakta ve üç-boyutlu kalıp yüzeyini ayırklaştırmaktadırlar. Nihayet temas noktaları, kalıp ile temas eden sonlu eleman ağının düğüm noktalarıdır.

Temas arama veriminin yükseltmek için temas segmanları üç bölgenin içine gömülmektedirler (Şavkılıoğlu, 1995):

1. *Küresel Bölge*: Küresel koordinat sistemi içinde bir dikdörtgen alanı kaplayan bu bölge Şekil 12a'da verilmiştir. Bölgenin çevrelediği segmanın köşe noktalarından asgari uzaklığı Δ kadardır. Küresel bölgeler (Tekkaya, 1992)'de tanımlanan genişletilmiş bölgelere karşılık gelmektedir. İki-boyuttaki tanım ile burada tanımlanan bölge arasındaki tek fark üç-boyutta küresel bölgelerin kesişmesidir. Bu nedenle, bu bölgelerin özel bir itina ile kullanılması gerekmektedir.
2. *Genişletilmiş Bölgeler*: Şekil 12b'de gösterilmiş olan genişletilmiş bölgeler genişletilmiş bir kalıp segmanının her iki yönde kendisine dik olarak δ_c kadar süpürülmesi ile elde edilmektedir. Genişleme miktarı kalıp segmanlarının boyutları ile orantılıdır.
3. *Temas Bölgesi*: Genişletilmemiş bir kalıp segmanının her iki yönde süpürülmesi ile elde edilen bölgeler temas bölgeleri olarak tanımlanmaktadır, Şekil 12c. Bu bölgeler ilk defa (Zhong, 1990)'da kullanılmıştır.



Şekil 12: Temas segmanlarını çevreleyen hiyerarşik bölge tanımları

İş-parçasının bir düğüm noktası kalıp ile temasta olması için hesaplama adımı sonunda ilgili kalıp segmanının temas bölgesinin içinde yer alması gerekmektedir. Bu temas durumu üç şekilde değişebilir:

1. Temasda bulunmayan (serbest) bir düğüm noktası temas durumuna gelebilir
2. Bir kalıp segmanı ile temasta olan bir düğüm noktası, segman boyunca kayarak başka bir kalıp segmanının temas bölgesine girebilir.
3. Temasta olan bir düğüm noktası teması kaybedebilir

Her üç durumda değişik yaklaşımlar kullanılmaktadır:

i) Serbest düğüm noktalarının kalıba temas etmesi: İlk uygulanan iki test küresel ve genişletilmiş bölge testleridir. Küresel bir bölgenin içinde olupta genişletilmiş bölgelerin dışında olan noktalar için iki seçenek vardır: Eğer nokta kalıbın dış tarafındaysa, düğüm noktası temas testlerinden çıkartılır. Ancak kalıbın içindeyse temel penetrasyon testlerine tabi tutulur. Temel penetrasyonun oluşması için düğüm noktasının temas toleransı δ_c 'den büyük bir değer kadar penetre etmiş olması gerekmektedir. Şayet temel penetrasyona uğramış herhangi bir düğüm noktası bulunursa, tüm zaman adımı düzeltilmiş bir zaman

aralığı için tekrarlanır. Yeni zaman adımı sonunda ilgili düğüm noktasının tam temas bölgesinin içine düşmesi beklenmektedir.

Öte yandan, genişletilmiş bölgelerin içine düşen bir düğüm noktası için tüm ilgili kalıp segmanları bulunur. Eğer birden fazla genişletilmiş bölge varsa ve nokta bu bölgelerden yalnızca bir tanesinin temas bölgesine giriyorsa, söz konusu düğüm noktasının ilgili kalıp segmanı ile temasta olduğu kabul edilir. Ancak, birçok genişletilmiş bölgeye girmesine rağmen, nokta hiç bir temas bölgesine girmiyorsa, ikinci derece penetrasyon test edilir, yani, iş-parçasının düğüm noktasının gerçekten en yakın olduğu kalıp segmanına ait olup olmadığı kontrol edilir.

Son olarak da, bir düğüm noktasının iki veya daha fazla kalıp segmanı tarafından oluşturulan keskin bir köşenin veya vadinin içinde olup olmadığı tesbit edilir.

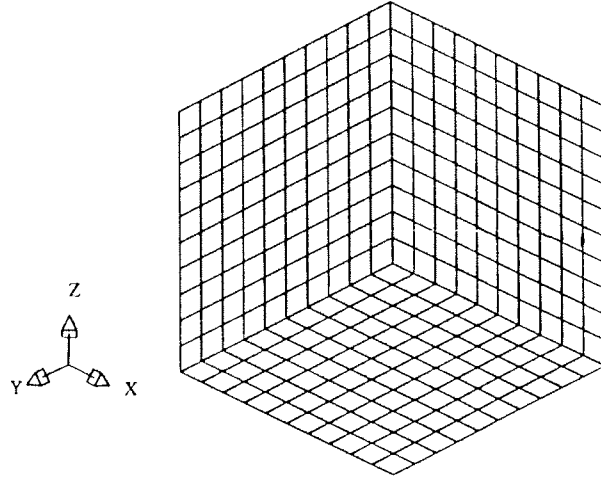
ii) Kalıp-segmanlarının değişmesi: Eğer daha önce herhangi bir kalıp segmanı ile temasta olan bir düğüm noktası, zaman dilimi sonunda, bu segmanın sınırları içinde değilse, bu nokta ya segman değiştirmiştir ya da serbest kalmıştır. Böyle bir durumda, düğüm noktasının ilgili kalıp segmanının çevresindeki segmanlara olan iz düşümleri bulunur ve en küçük iz düşümü değerini veren segman ile eşleştirilir. Eğer bu en küçük iz düşümü segman bölgeleri içinde değilse düğüm noktası serbest bırakılır.

iii) Düğüm noktalarının serbest bırakılması: Eğer düğüm noktası ile kalıp segmanı arasındaki dik kuvvet sıfır veya çekme yönündeyse, temas eden nokta serbest bırakılır.

6 KARŞILAŞTIRMALAR

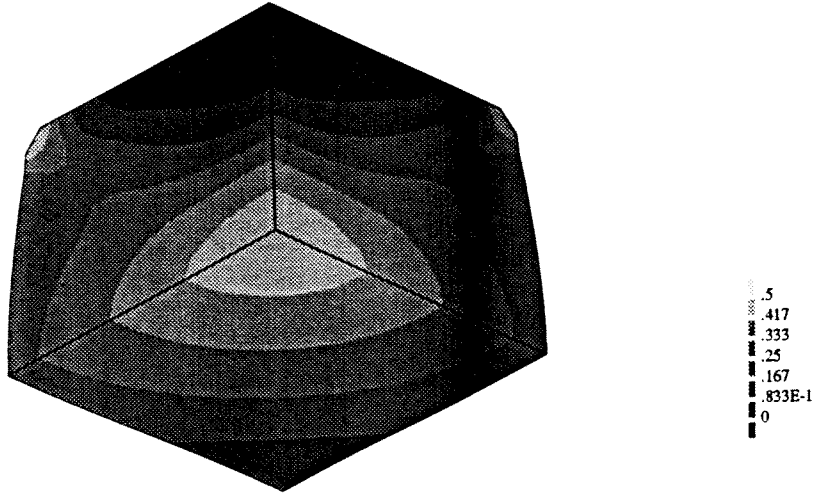
Geliştirilen yöntemin ve bu yöntemi uygulayan yazılımın doğruluğunu kontrol etmek için kapsamlı karşılaştırmalar yapılmıştır. Bunlardan en basiti sürtünmesiz yığma ve çekme işlemlerinin benzetimi idi. Bilindiği gibi bu iki işlem için tam doğru analitik çözümler bilinmemektedir. Elde edilen sonuçlar analitik sonuçlar ile tam bir uyum göstermektedirler. Bu nedenle burada gösterilmemektedirler. Sürtünmesiz hesaplama sonuçları, her ne kadar yazılımın genelde doğru çalıştığı kanıtını vermekteydesede, sürtünme durumunda oluşan sıkıştırmazlık ve temas problemlerini tam olarak kontrol etme olanağını vermemektedirler. Bu nedenle, proje çerçevesinde, ticari bir yazılım ile de karşılaştırmalar yapma gereği doğmuştur.

Sonuç olarak, tutkan sürtünme şartlarında üç-boyutlu bir yığma işlemi hem PLADAN ile hem de MARC adlı ticari bir yazılımla hesaplanmıştır. MARC'ın üç-boyutlu otomatik



Şekil 13: Karşılaştırma problemi için ilk ağ

ağ-yenileme becerisi olmadığı için problem yalnızca % 20'lik bir yığıma oranına kadar çözülmüştür. Seçilen ilk sonlu eleman ağı Şekil 13'de verilmektedir. Kullanılan ağ düzgün bir 10 X 10 X 10'luk yapıya sahip toplam 1000 sekiz düğüm noktalı kutu elemanından oluşmaktadır.

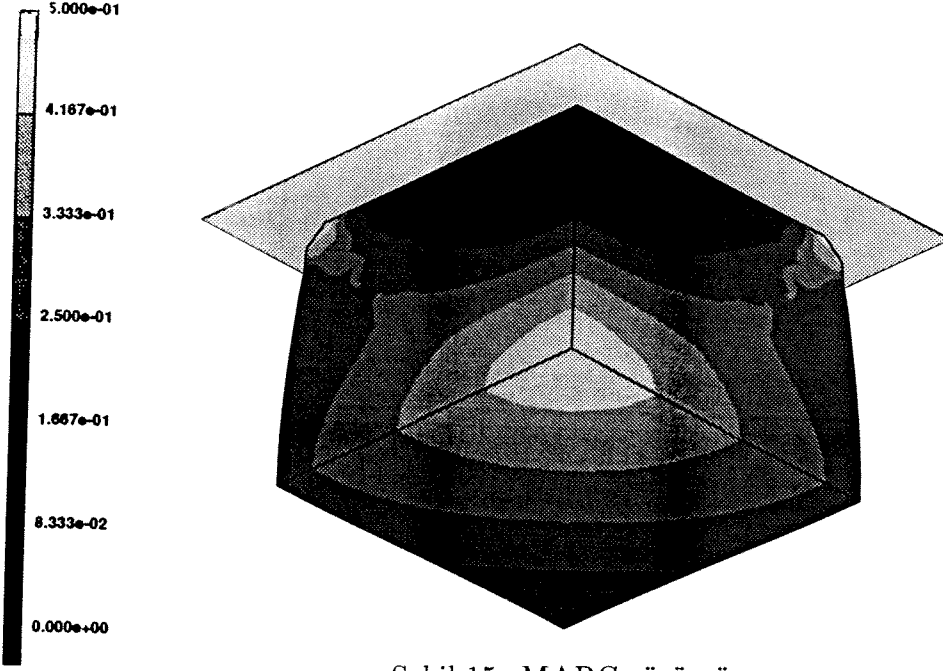


Şekil 14: PLADAN çözümü

Şekil 14'da PLADAN ile elde edilen çözüm verilmiştir. Burada % 20'lik bir yığıma işlemi sonundaki eşdeğer plastik genleme dağılımı verilmektedir. Kullanılan malzeme için

$$k_f = 720\varphi^{0.25} \text{MPa} \quad (43)$$

ve ilk akma değeri olarak da 240 MPa kullanılmıştır. Çözüm için 0.02 saniyelik hesaplama adımları ve 1 mm/s'lik bir üst kalıp hızı varsayılmıştır. Rijit bölgelerinin tanımlanması için kullanılan sınırlandırıcı eşdeğer plastik genleme hızı ise 0.001 s^{-1} olarak seçilmiştir. MARC ile elde sonuçlar ise Şekil 15'de verilmiştir.



Şekil 15: MARC çözümü

Şekillerden de görüldüğü gibi iki çözüm arasında mümkün bir uyum gözlenmektedir. Daha da sevindirici olan sonuç ise, PLADAN'ın MARC'a göre aynı donanım üzerinde % 35 daha hızlı çalışması olmuştur. Bu şekilde, projede amaçlanan hızlı bir simülasyon yöntemine ulaşılmış olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, şu anda ticari olarak hiçbir yazılımın beceremediği otomatik üç-boyutlu kutu eleman ağı yaratılmasının PLADAN tarafından sorunsuzca yapılabilmesi ayrıca sevindiricidir.

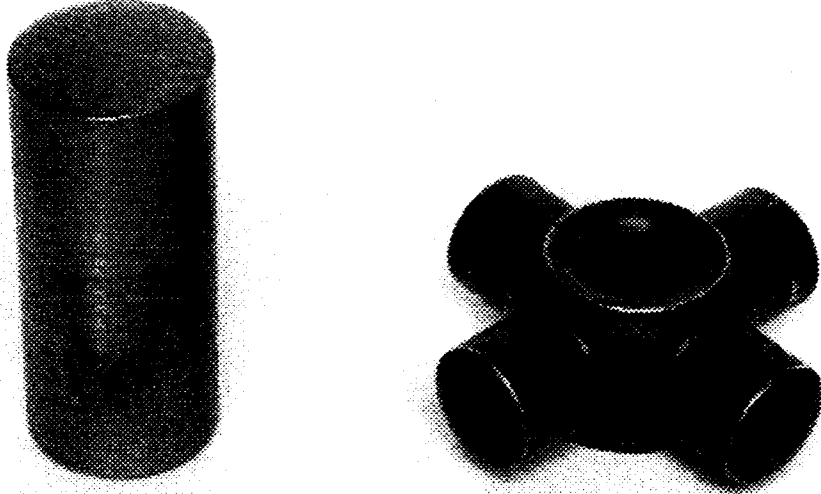
7 UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Bu bölümde üç tipik uygulama örneği verilecektir. Bunların ilk ikisi gerçek sanayi uygulaması olup üçüncü örnek akademik üç-boyutlu simülasyon bir örneğidir.

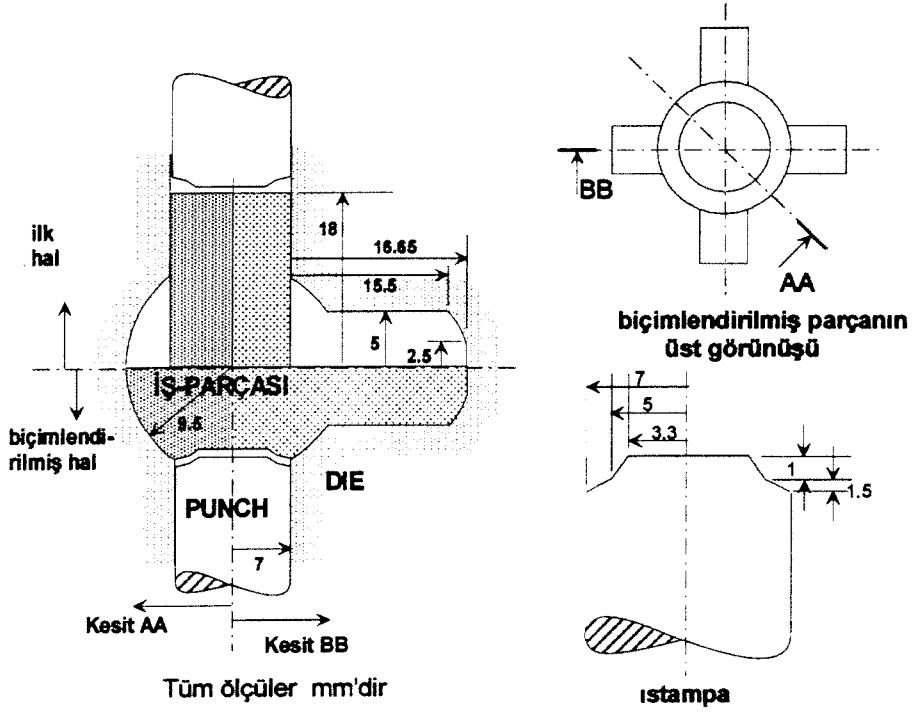
7.1 Radial Ekstrüzyon

Istavrozların soğuk radial ekstrüzyonu, son derece ileri teknolojik seviyede olan düşük maliyetli bir üretim örneğidir. 800 g ağırlığa kadar milyonlarca istavroz radial ekstrüzyon yöntemiyle üretilirken, işlemin literatürde çok az analizi yapılmıştır. Bu modern yöntemden önce, ülkemizde de halen yapıldığı gibi, bu istavrozlar sıcak dövme işlemi ile üretilmekteydi.

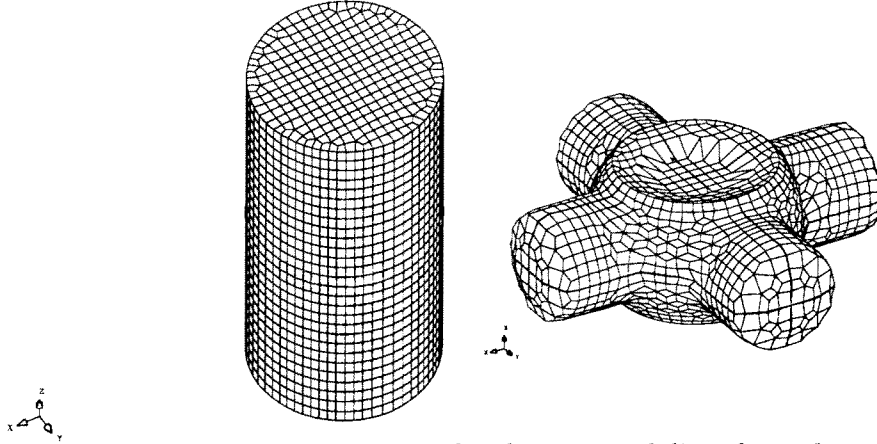
Istavrozların soğuk radial ekstrüzyonu kesilmiş ve yüzeyi kaplanmış basit silindirik parçalar ile başlamaktadır. Bunlar yatay olarak ayrılmış bir kalıp sisteminin içine konduktan sonra tek bir istampa hareketi ile alın geometrileri ve yan ayakları hazır du-



Şekil 16: Istavrozun ilk ve son durumu



Şekil 17: Istavrozun üretimi için kullanılan kalıp ve ıstampa



Şekil 18: İstavrozun başlangıç sonlu eleman modeli ve hesaplanan son durumu

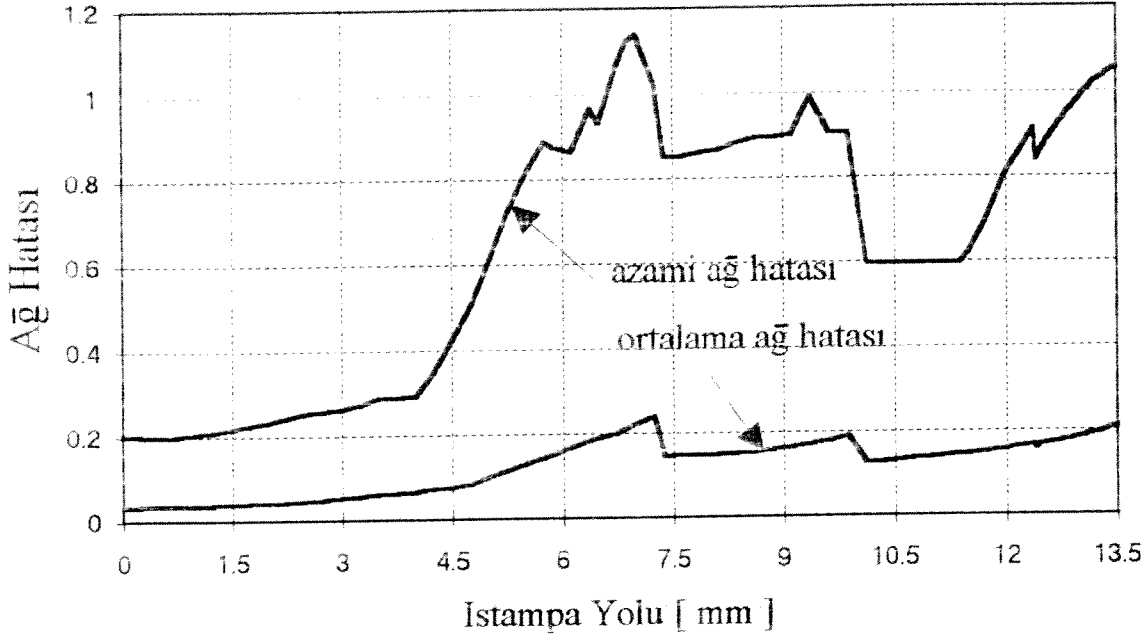
rumda saniyede 35 ile 50 arası olmak üzere üretilirler. Şekil 16'de ilk iş-parçası ve üretilmiş olan bir istavrozun resmi verilmektedir. Bilgisayar simülasyonu için işleme ilgili bazı varsayımların yapılması gerekmiştir: İlk olarak kalıpların boyutsal ayrıntıları Şekil 17'da verildiği gibi kabul edilmiştir. Gerçek üretimde alın şeklinin biçimlendirilmesi işlemin başında olmasına rağmen, sayısal benzetimde ikinci otomatik ağ yenilemesinden sonra yapılmıştır. Böylece daha sağlıklı bir sonlu eleman ağının elde edilmesi sağlanmıştır. İkinci varsayım olarak, malzemenin bir *Ck 15* çeliği olduğu ve akma eğrisinin

$$k_f = 763.1 \varphi^{0.245} \text{N/mm}^2 \quad (44)$$

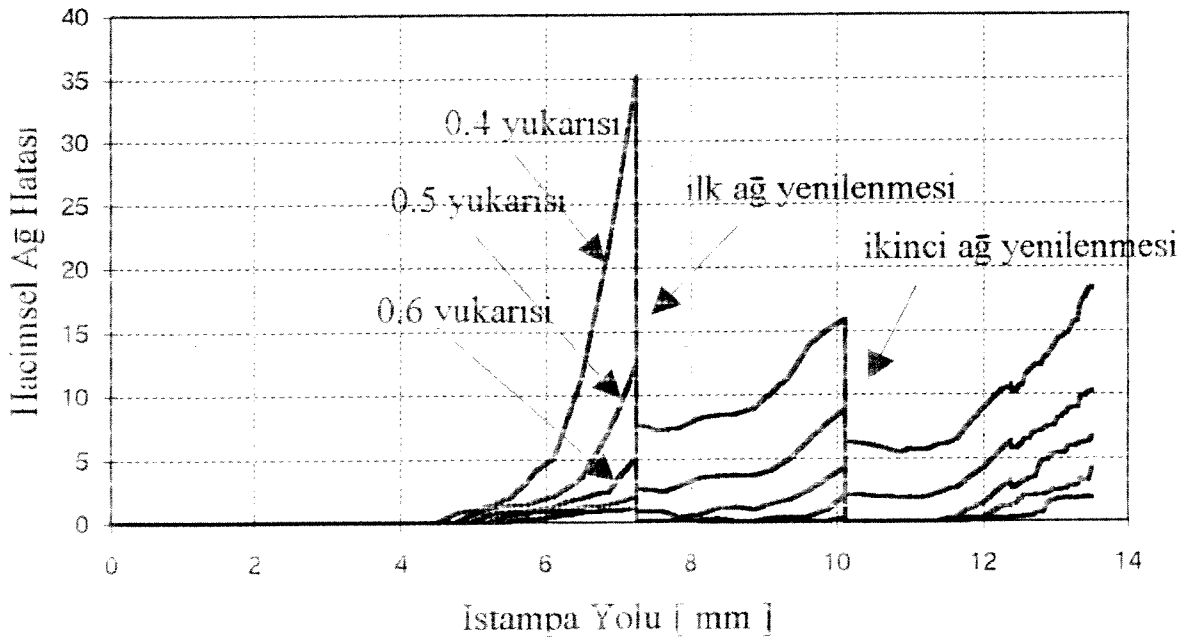
ve ilk akma gerilmesinin 240 N/mm^2 olarak alınabileceği öngörülmüştür. Sürtünme katsayısı bilinmediği için sürtünme genelde ihmal edilmiş ancak ıstampanın alın yüzeyinde yapışkan sürtünme varsayılmıştır.

Şekil 18'de bilgisayar benzetimi için kullanılan ilk iş-parçasının sonlu eleman modeli ve hesaplamalar sonunda elde edilen biçimlendirilmiş istavroz görülmektedir. Simetriden dolayı aslında istavrozun yalnızca sekizde biri hesaplanmıştır. Ancak sonuçların daha iyi algılanabilmesi için hep tam şekil gösterilmektedir. İlk durumda toplam 952 sekiz düğüm noktalı trilinear kutu elemanı kullanılmıştır. Kalıp ve ıstampa 468 dörtgen fazet elemanı ile modellenmiştir. Tüm işlem 0.2 mm 'lik adımlarla çözülmüş ve 5×10^{-2} 'lik bir yakınsama limiti kullanılmıştır.

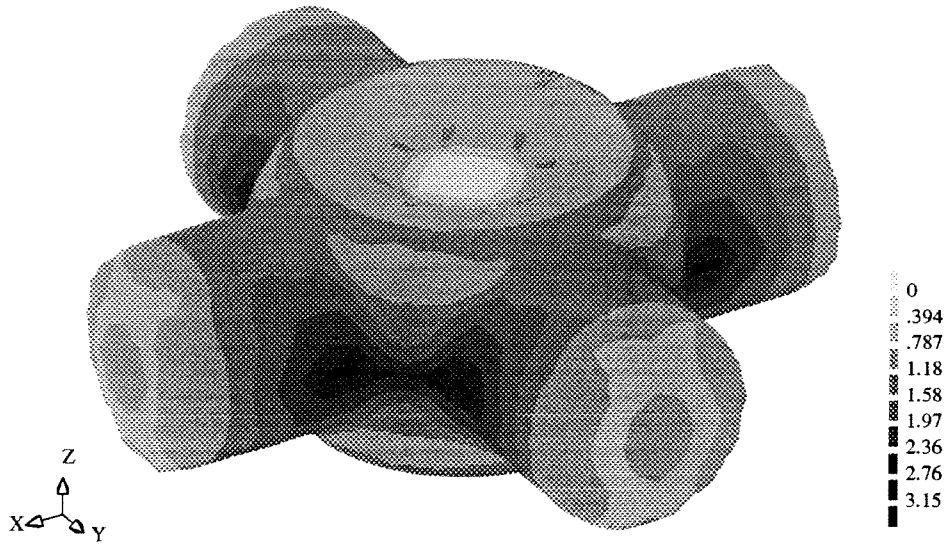
Şekil 18'da gösterilen iş-parçasının son hesaplanmış şekli, ıstampa yolunun 7.3 ve 10.1 mm 'lik konumlarında yapılan iki otomatik ağ-yenilemesi ile elde edilmiştir. İlk ağ-yenilemesinden sonra eleman sayısı 542 ve ikinci eleman ağ-yenilemesinden sonra ise 580 olarak değişmiştir. Ağın ıstampa yolu ile değişen azami ve ortalama ağ-kalite göstergeleri,



Şekil 19: Istavrozun sayısal benzetimi sırasında azami ve ortalama ağ kalitesi



Şekil 20: Istavrozun sayısal benzetimi sırasında hacimsel ağ kalitesi



Şekil 21: İstavrozun üretilmiş son durumu için eşdeğer plastik genleme dağılımı

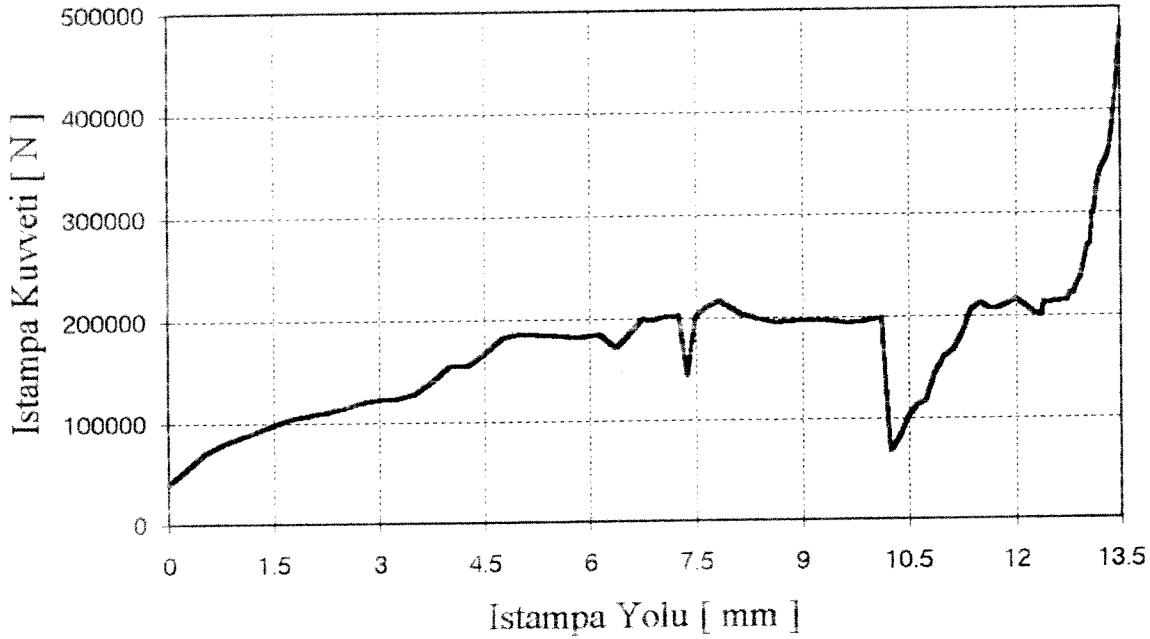
Şekil 19'da verilmektedir. Ağ kalitesi ξ_{ang} 'in hesaplanması (Tekkaya, 1994)'de verilmektedir. Ayrıca Şekil 20'de azami ağ kalitesinin eleman ağı içindeki hacimsel dağılımı ϵ_a verilmektedir. Bu dağılım,

$$\epsilon_a = \frac{(\sum_e V_e^a)}{V} \times 100\% \quad (45)$$

ile hesaplanmıştır. Burada, V_e^a , eleman kalitesi $\xi_{ang} < a$ olan tüm elemanların hacimlerinin toplam hacim V 'e olan oranıdır. Şekil 19'dan ağ kalitesinin iş-parçasının ayakları oluşmaya başlaması ile aniden düştüğü görülmektedir (ıstampa yolu 4.5 mm). Öte yandan, Şekil 20'den ise gerçekten bozulmuş olan elemanların hacimsel oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Hesaplanan eşdeğer plastik genleme değerlerini ıstavrozun üretilmiş son durumu için Şekil 21'de verilmektedir. En yüksek eşdeğer plastik genlemenin değeri 2.9'dur ve ayaklar arasında simetri düzleminde görülmektedir. Bu sonuçlar (Geiger, 1983) ile uyum göstermekte ve ayrıca soğuk ekstrüzyonla elde edilmiş olan parçaların neden kalitesinin yüksek olduğuna dair bir fikir vermektedir: gerilme yığılmalarının beklendiği bölgelerde yüksek bir mukavemet göstermekte ve böylece yorulma çatlaklarının kullanım sırasında oluşumunu geciktirmektedirler.

İstampa kuvvetinin ıstampa yolu ile değişimi Şekil 22'de verilmektedir. Hesaplanan kuvvetlerin sürtünmesiz bir durum için bulunduğu hatırlanmalıdır. Biçimlendirme süresince, iş-parçasının değişik bölgeleri rijit davrandığı için ıstampa kuvvetinin, F , bulunması için değişik bir yol izlenmiştir: F 'in hesaplanması için güç dengesi kuramından



Şekil 22: İstampa kuvvetinin istampa yolu ile değişimi

hareket edilmiş ve şu bağıntıya göre kuvvet değerleri bulunmuştur:

$$F = \frac{\int_V k_f \dot{\varphi} dV + P_f}{v_p} \quad (46)$$

Burada, P_f sürtünme nedeniyle kaybolan güç ve v_p istampa hızıdır. Şekil 22 göz önüne alındığında, istampa kuvvetinin ayaklar oluşmaya başladıktan sonra, yani 4.5 mm istampa yolundan sonra, 10 mm istampa yoluna kadar hemen hemen sabit kaldığıdır. 10 mm istampa yolunda alın yüzeyindeki püskürtme işlemi başlamaktadır. 12 mm istampa yolundan sonra ise kuvvette ani bir yükselme görülmektedir. Bu yükselmenin nedeni ayakların sınırlandırma stoplarına değmesinden kaynaklanmaktadır.

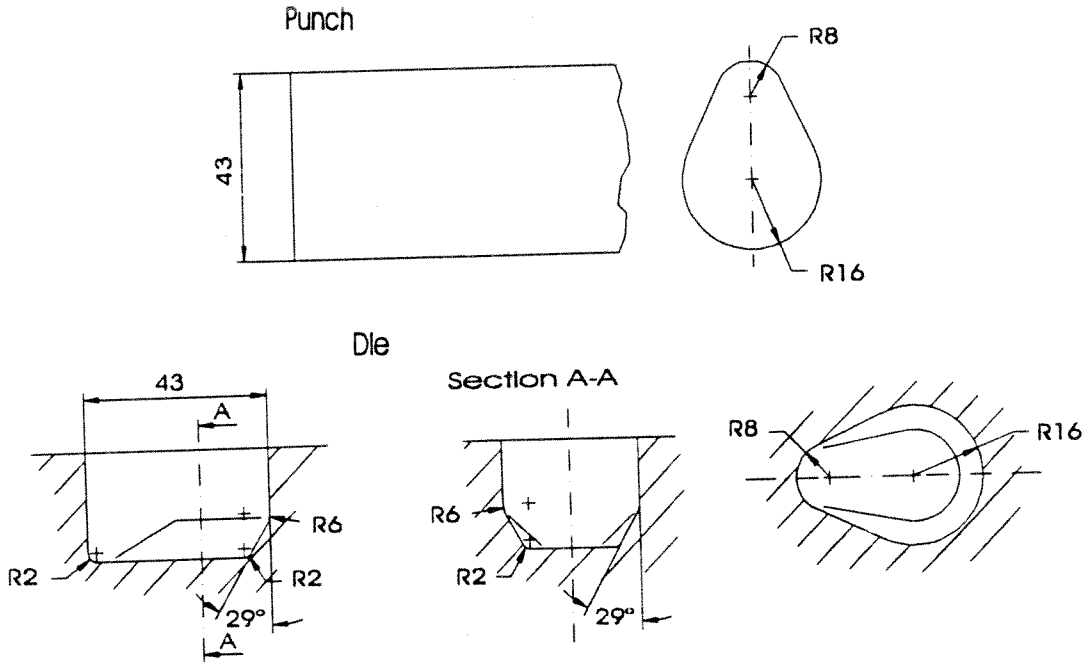
7.2 İki Kademeli Ekstrüzyon

Bu bölümde tanıtılacak örnek de gerçek üretimde olan bir iş-parçasından seçilmiştir. Parça iki kademede üretilmektedir. Malzeme bir *Ck 15* çeliğidir ve akma eğrisi

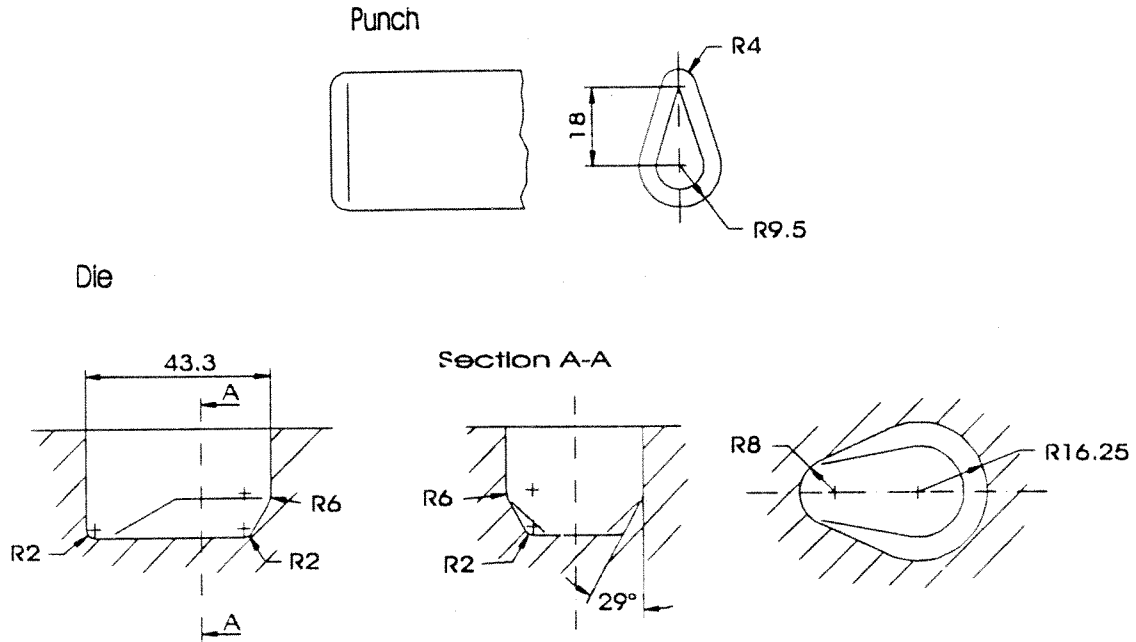
$$k_f = 763.1 \varphi^{0.245} \text{N/mm}^2 \quad (47)$$

ve ilk akma gerilmesi 240 N/mm^2 olarak ölçülmüştür. Ön başlangıç parçası basit silindirik olup, 29 mm çapı ve 21 mm yüksekliği vardır. İlk biçimlendirme kademesinde parça düz alınlı bir istampa ile Şekil 23'de gösterilen kalıbın içine sıkıştırılmaktadır. Asıl biçimlendirme kademesinde ise, alın yüzeyi yuvarlatılmış bir istampa ile geri püskürtme işlemi yapılmaktadır, Şekil 24.

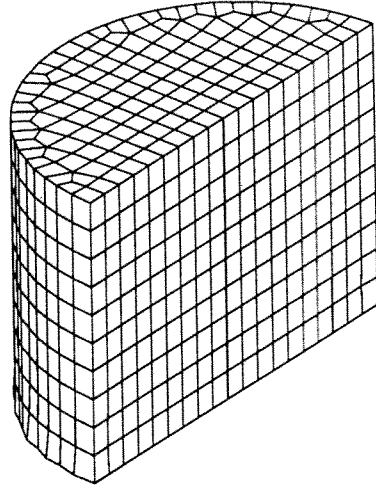
Simteriden ötürü, problemin yalnızca yarısı incelenmiştir. Kullanılan ilk parçanın sonlu eleman ağı Şekil 25'de verilmektedir. Toplam 1350 sekiz düğüm noktalı kutu eleman



Şekil 23: Ön biçimlendirme kademesi için kalıp ve ıstampa



Şekil 24: Asıl biçimlendirme kademesi için kalıp ve ıstampa

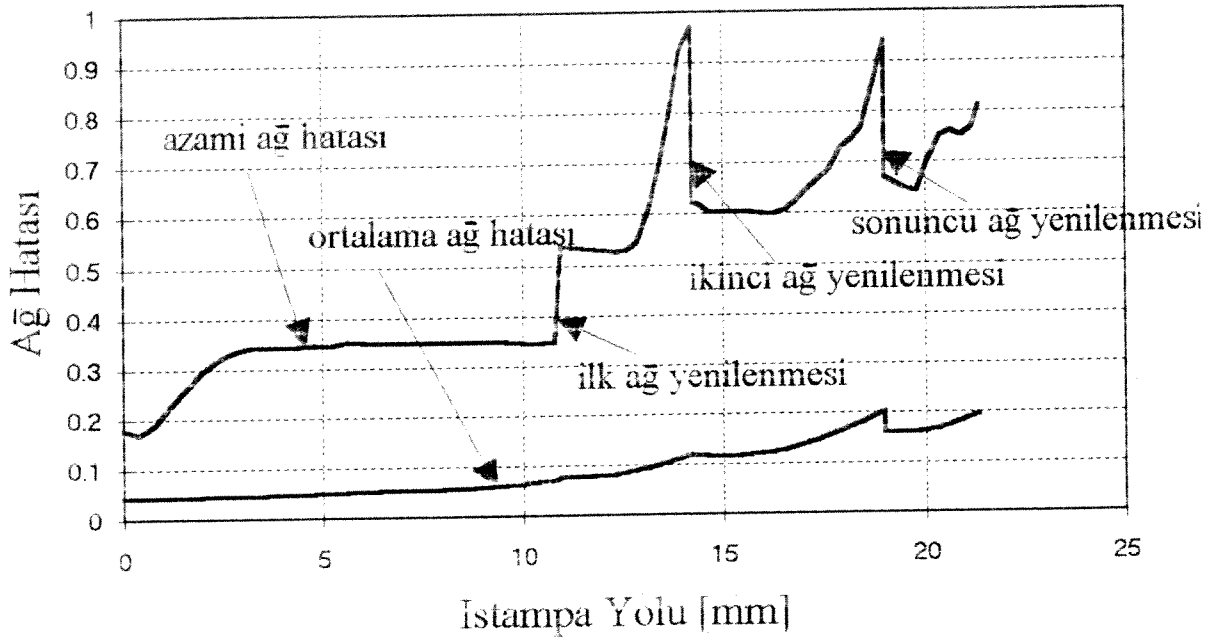


Şekil 25: Başlangıç sonlu eleman ağı

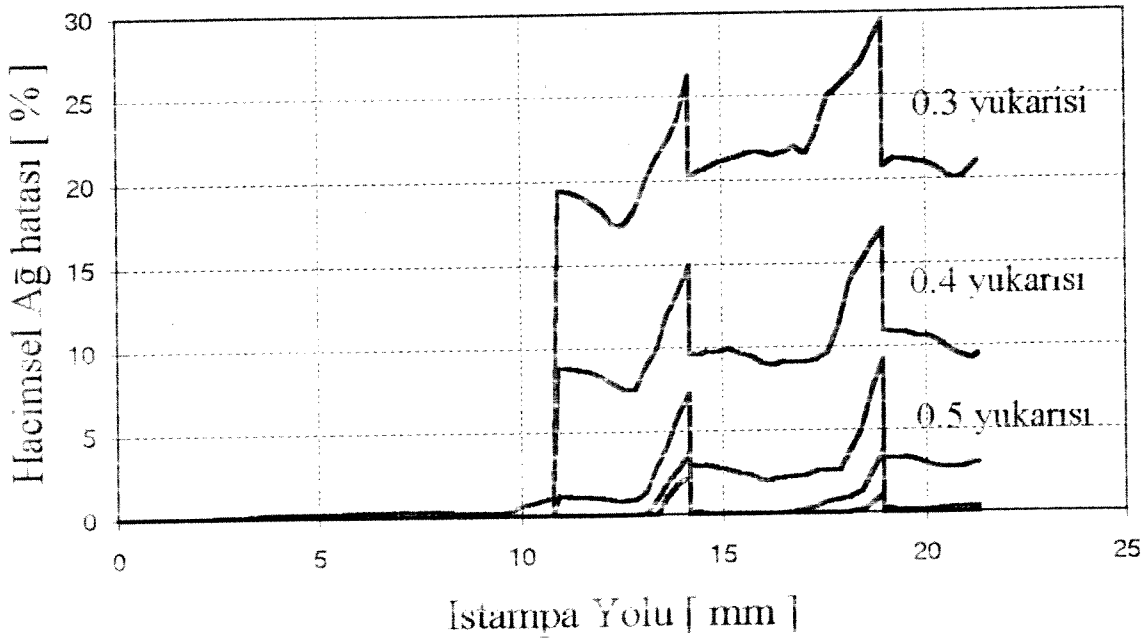
kullanılmıştır. İlk biçimlendirme kademesi sonunda iş-parçası 16.3 mm yüksekliğe indirgenmiştir. Bunun için 10.8 mm'lik bir ıstampa yolu katedilmiştir. Bu şekilde kalıp içindeki boşluklar tam olarak doldurulmuştur. İlk kademe tamamlandıktan sonra, ikinci kademeye dayanaklı bir yeni eleman ağı üretilmiştir. İkinci biçimlendirme kademesi sırasında iki otomatik ağ yenileme işlemi daha yapılmıştır. Bunlar 14.21 ve 18.97 mm'lik ıstampa yollarında gerçekleştirilmişlerdir.

Şekil 26 ve Şekil 27'da ağın azami, ortalama ve hacimsel kalite göstergeleri biçimlendirme işlemi boyunca verilmektedir. İlk ağ yenilemesinden sonra görülen *ağın bozulması* yanlıtıdır. Çünkü, burada oldukça zor olan geri püskürtme işlemi için uygun bir yeni ağ yaratılmıştır. Bu yeni ağ doğal olarak eski ağa göre daha düşük bir kalite gösterirken, geri püskürtme işlemi sırasında Şekil 26'de de görüldüğü gibi, uzun bir süre kalitesini koruyabilmiştir. Sonuç olarak, yukarıdaki şekillerde gösterilen değerler geliştirilen otomatik ağ yaratma yönteminin başarısı simgelemektedir.

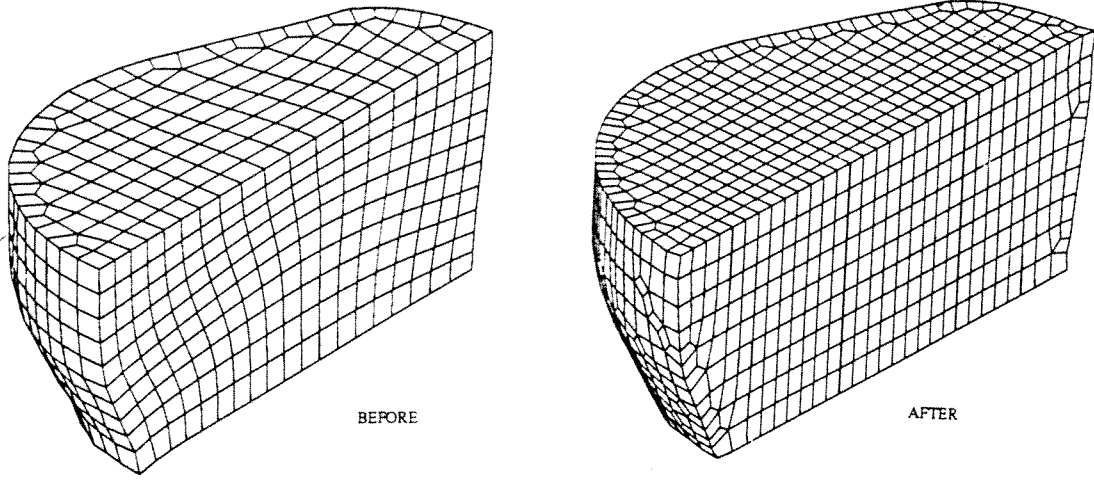
Şekiller 28, 29 ve 30 gerçekleştirilen üç otomatik ağ yenileme işlemi göstermektedirler. Görüldüğü gibi her ağ yenileme işlemi sonunda bazı keskin köşeler yuvarlatılmaktadır. Kullanılacak elemanların sıklığı ile bu yuvarlatmalar yok edilebilir. Ancak, bu proje çerçevesinde kullanılan donanımın hızı nedeniyle mümkün olan en az sayıda eleman kullanılmıştır. Biçimlendirme işlemi 21.18 mm'lik bir ıstampa yolundan sonra tamamlanmıştır. Bu durumda iş-parçasının taban kalınlığı 6 mm olarak elde edilmiştir. Bu son durumda iş-parçası içindeki hız dağılımı Şekil 31'de verilmektedir. Burada artı olan hızlardan geri püskürtme işlemi açık olarak görülebilmektedir.



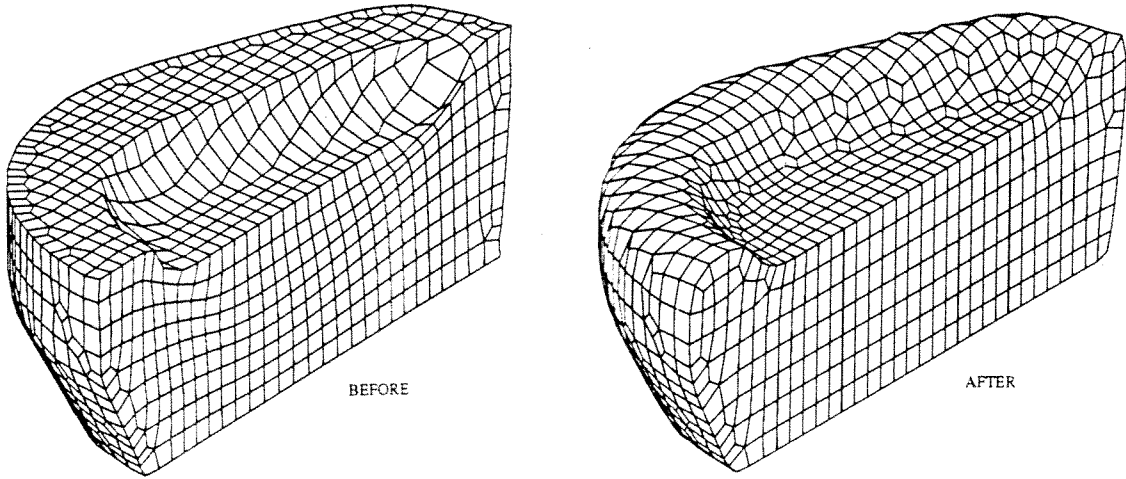
Şekil 26: Azami ve ortalama ağ kalitesi



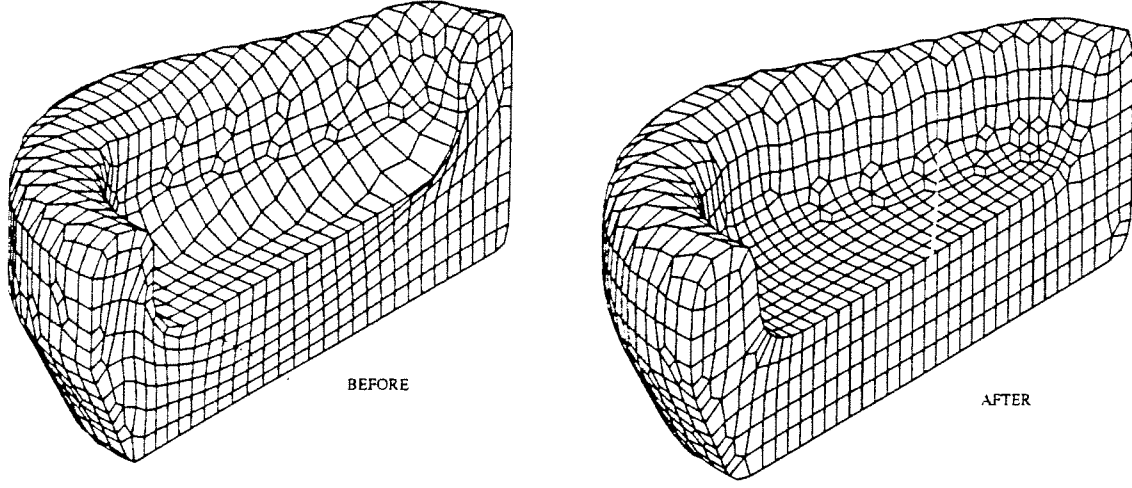
Şekil 27: Hacimsel ağ kalitesi



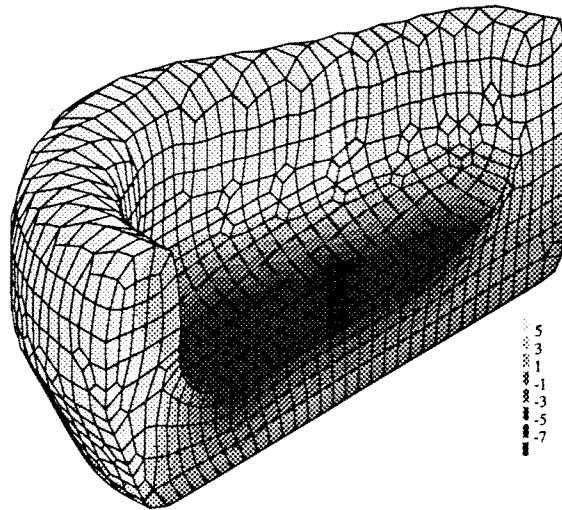
Şekil 28: İlk otomatik ağ yenilemesi



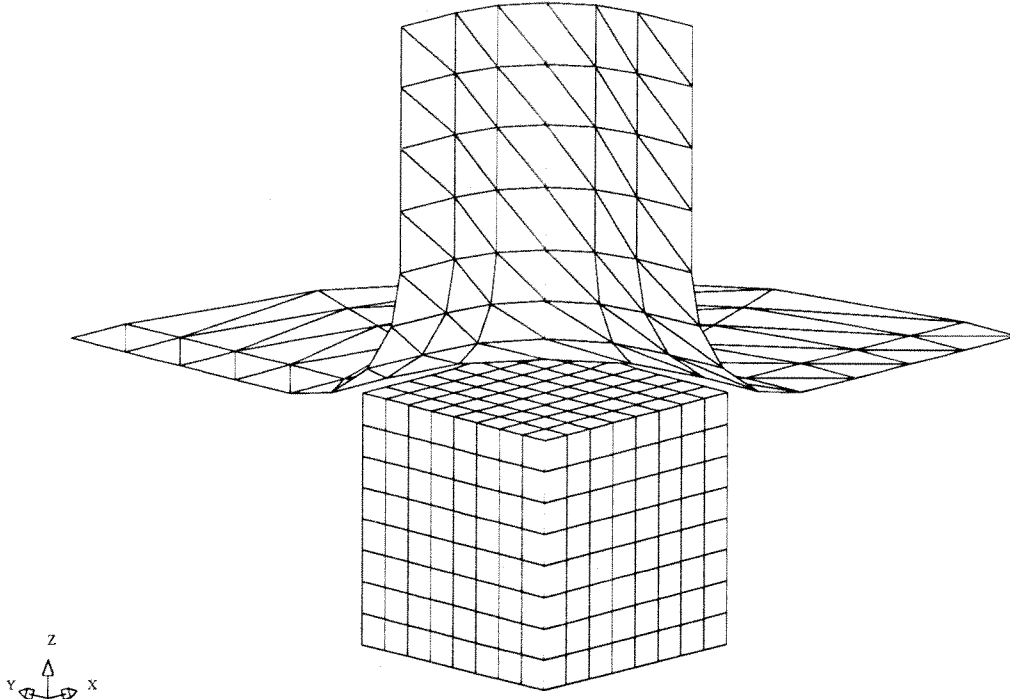
Şekil 29: İkinci otomatik ağ yenilemesi



Şekil 30: Üçüncü otomatik ağ yenilemesi



Şekil 31: İş-parçasının son durumu ve hız profili



Şekil 32: Üç-boyutlu dövme işlemi için kalıp ve iş-parçası tanımları

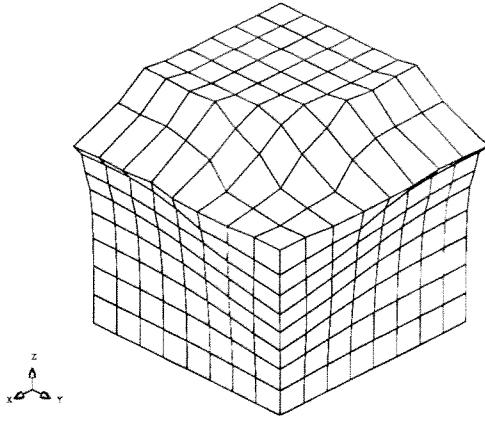
7.3 Üç-Boyutlu Dövme

Örnek problemin kalıp ve iş-parçası Şekil 32'de verilmektedir. Simetriden dolayı şekilde yalnızca problemin sekizde biri verilmiştir. Kullanılan biçimlendirilmemiş iş-parçası 2 X 2 X 2 birim uzunluğunda olan bir küptür. Malzeme özelliği ise bir C15 çeliğine eşdeğer olan

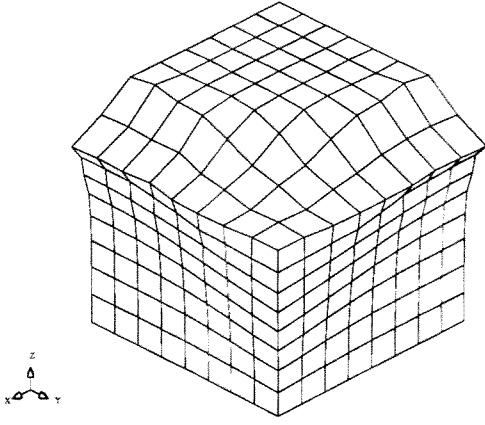
$$k_f = 720 \varphi^{0.25} \text{MPa} \quad (48)$$

şeklindeki akma eğrisi ile ifade edilmektedir. İlk akma gerilmesi 240 MPa olarak alınmaktadır. Kalıp dairesel bir alt kısım ile köşeleri yuvarlatılmış bir kare kesiti olan üst boğaza kavuşmaktadır. Sürtünme eksik veri nedeniyle ihmal edilmiştir. Aslında simetriden dolayı problemin onaltıda biri de çözülebilirken, ilk ağ yaratılmasında bu küçük dilimin daha fazla zorluk yaratabileceği düşünülerek sekizde birlik bir geometri ile başlanılmıştır. Şekil 32'da gösterilen sekizde birlik problem için kalıp yüzeyleri 144 üçgen segmanla, iş-parçası ise 512 sekiz-düğüm noktalı tri-linear isoparametric kutu elemanları ile modellenmiştir.

Kalıp hızı 1 birim uzunluk/saniye, zaman adımı 0.02 saniye ve yakınsama limiti hızın Euclidean normu cinsinden 10^{-1} olarak alındığında, 0.2 birim uzunluk kadar bir kalıp ilerlemesi sonucunda elde edilen deforme olmuş iş-parçası Şekil 33a'da verilmektedir. Burada eleman ağı bozulduğu için, otomatik olarak bir ağ-gevşemesi işlemi uygulanmıştır. Bu



a) Orijinal deforme olmuş eleman ağı

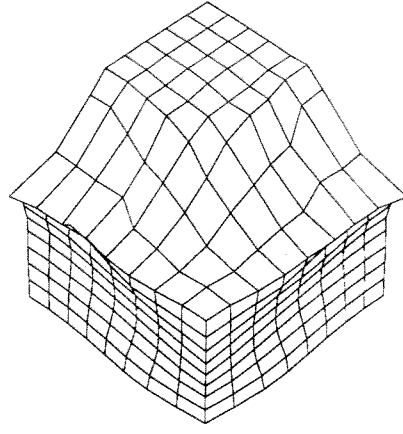


b) Otomatik olarak elde edilen gevşetilmiş eleman ağı

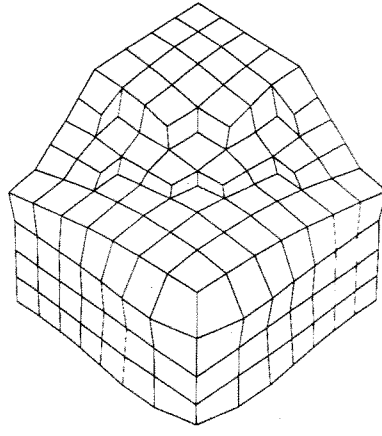
Şekil 33: Kalıbın 0.2 birim uzunluk kadar hareketinden sonra elde edilen deforme olmuş ve gevşetilmiş eleman ağları

aşamada eleman bozukluğunu gösteren ξ_{ang} indikatörünün en yüksek değeri yerel olarak 0.65 ve ortalama değeri ise 0.11'dir. Şekil 33b, gevşemeden sonraki eleman ağını göstermektedir. Yeni ağın en yüksek eleman bozukluk göstergesi $\xi_{ang} = 0.42$ 'e inerken, ortalama değeri de 0.06'ya inmiştir.

Kalıp 0.46 birim uzunluk kadar ilerledikten sonra, eleman bozulma göstergesi yerel olarak $\xi_{ang} = 0.74$ 'e çıkmıştır, Şekil 34a. Bu nedenle bu kalıp konumunda Şekil 34b'de verilen yeni ağ otomatik olarak yaratılmıştır. Yeni yaratılan ağdaki yerel eleman bozukluğu 0.66'ya indirilmiştir. Yeni eleman sayısı ise 368'e inmiştir. Orijinal geometrideki keskin köşeler yeni ağ ile yuvarlatılmıştır. Ancak bu yuvarlama değeri yeni ağdaki eleman sayısı artırıldığında düşmektedir.



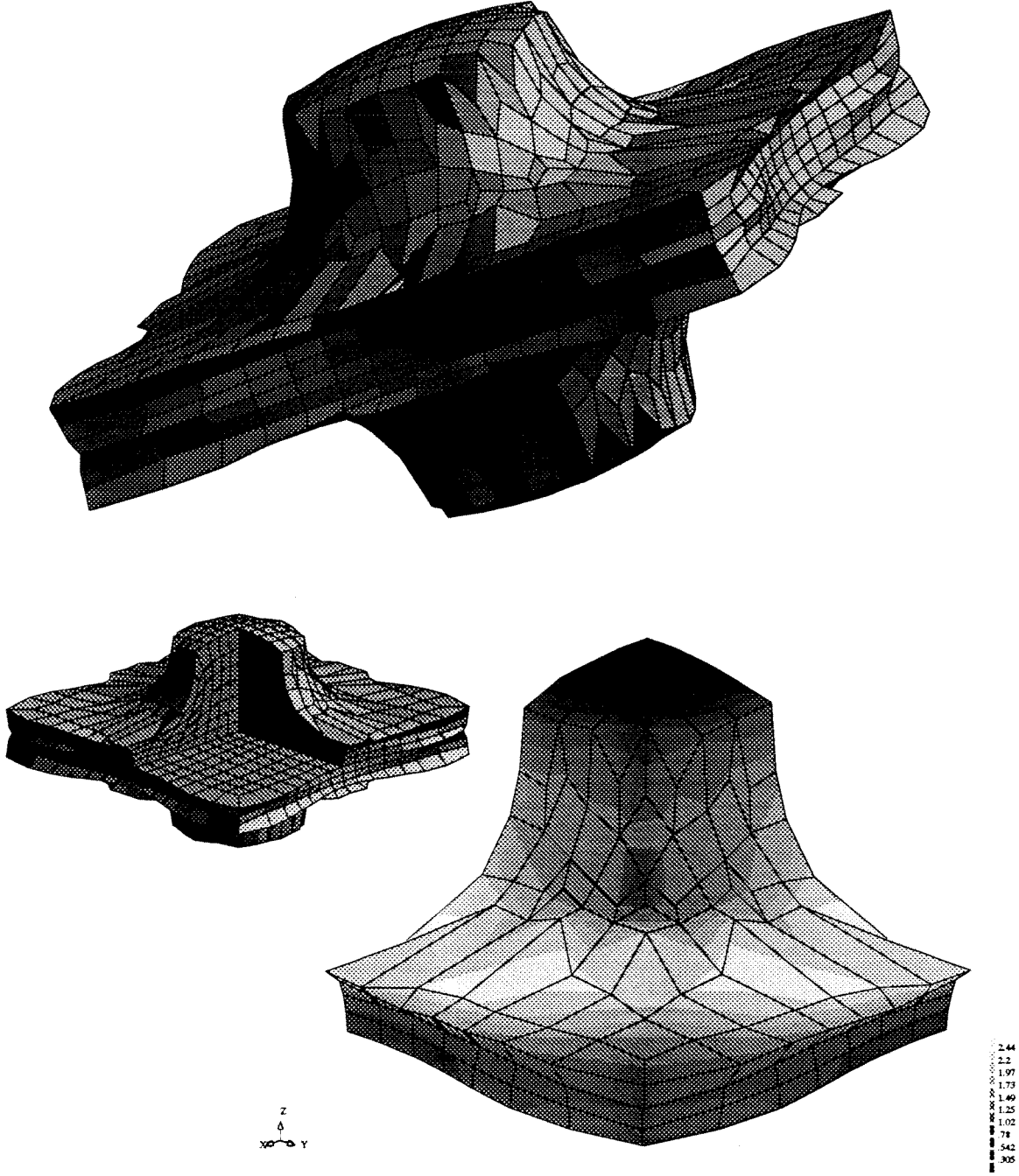
a) Orijinal deforme olmuş eleman ağı



b) Otomatik olarak elde edilen yeni yaratılmış eleman ağı

Şekil 34: Kalıbın 0.46 birim uzunluk kadar hareketinden sonra elde edilen deforme olmuş ve yeni yaratılmış eleman ağları

Şekil 35'de kalıbın son konumu için elde edilen iş-parçasının tam şekli ve eşdeğer genleme dağılımı verilmektedir. Kalıp son konumda almış olduğu yol 0.89 birim uzunluk kadardır. Verilen sonuçlar çok açık bir şekilde ortadaki kolonun nasıl ekstrüde edildiğini ve yandaki plakaların dışa fıskırtıldığını göstermektedirler. En yüksek eşdeğer plastik genlemesinin değeri 2.68'dir ve beklenildiği gibi orta kolonun simetri ekseninde görülmektedir. İş-parçasının ortasında görülen içe bükeylik ihmal edilen sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Temas analizi $\Delta = 0.1$ ve $\delta_c = 0.01$ birim uzunluklar ile yapılmıştır. En son durumdaki eleman bozukluğu $\xi_{ang} = 1.44$ 'dir. Elde edilen yeni ağın kalitesini kanıtlamak için bir defa daha yeni bir ağ yaratılmamıştır. Tüm hesaplama süresi bir DEC-5000/240 (ULTRIX) iş-istasyonunda 390 dakika kadardır.



Şekil 35: Kalıbın son konumdaki deforme edilmiş iş-parçası ve eşdeğer genleme dağılımı

8 SONUÇ ve ÖNERİLER

Tamamlanan MODİSA-11 nolu proje sonunda elde edilen önemli sonuçlar şunlardır:

1. Altı genç araştırmacının konuya ilgisi çekilmiş ve bu kişiler gerek kuramsal ve sayısal temeller konusunda gerekse de biçimlendirme teknolojisi ve bilgisayar uygulamaları konularında yetiştirilmişlerdir. Şu anda iki yüksek lisans tezinin yazımı tamamlanmış ve jüri aşamasına gelmiştir. İki yüksek lisans tezi de önümüzdeki yıl sonuçlanacaktır.
2. PLADAN isimli bir yazılım yaratılmıştır. Bilgim dahilinde gerek yurt içinde gerek yurt dışında PLADAN'ın sahip olduğu üstün özelliklere sahip ikinci bir yazılım yoktur. Bu yazılımın sanayide kullanılması ile metal biçimlendirme konusunda teknoloji üretimi bu konuda ilerlemiş ülkelerdeki kadar verimli ve süratli geliştirilebilecektir.
3. PLADAN'ın en çok vurgulanması gereken özellikleri şunlardır:
 - Yazılım gerçek sanayi uygulamalarında kullanılabilecek kadar akıllı, güvenilir ve yeteneklidir.
 - Yukarıda belirtilen özelliği sağlayan en önemli yetenek üç-boyutlu otomatik kutu eleman ağının yaratılmasıdır.
 - Basit ancak çok güvenilir özgün doğrusal temas algoritması sayesinde çok karmaşık kalıp/iş-parçası etkileşimleri sorunsuz çözülebilmektedir.
 - Simulasyon yönteminin gerektirdiği tüm sayısal parametreler her ne kadar kullanıcı tarafından da tesbit edilebiliyorsa da, PLADAN tüm gerekli parametreleri otomatik olarak hesaplayabilmektedir. Böylece, iş-yerindeki tasarımcı yalnızca geometriyi ve sınır koşullarını belirledikten sonra sayısal benzetim otomatik olarak sonuçlanabilmektedir.
4. Büyük yazılımların yazılması için gerek yazılım mühendisliği konusunda önemli bir birikim sağlanmıştır.
5. Bilimsel açıdan, özgün otomatik ağ yenileme algoritması ve özgün temas algoritması çeşitli uluslararası platformlarda ve dergilerde yayınlanmıştır.

MODİSA-11 nolu projenin proje önerisinde saptanan hedeflerinin büyük bir bölümüne ulaşılmıştır, bkz. Bölüm 1. Temelde tamamlanamayan konular termomekanik kenetleme

ve yetmezlik kriterleridir. Bunların da gerçekleşmeme nedeni (bkz. Bölüm 1) temelde orijinal proje önerisinde öngörülen genç araştırmacılara yapılması gerek personel ödemelerinin projenin başlangıç aşamasında *ilkesel kararlar* nedeniyle kabul edilemeyecek (900,000.- TL/ay) değerlere indirilmesi ve bu nedenle çok ama çok kıymetli iki araştırmacının proje grubundan ayrılması olmuştur. Bunlardan, Sayın Tuğrul Ertuğrul bu şartlarda projeye baştan katılmamış, Sayın Mehmet Fırat ise projenin ortalarında daha fazla ödeme yapan özel bir araştırma şirketine gitmiştir. Buna rağmen her iki konuyla ilgili çalışmalar için lisans ve doktora tezleri çerçevesinde daha *amatörce* (bu ifade ile zaman baskısı ve program/hedef baskısı olmayan, yarı organize olmuş ve saf akademik araştırmaları kastediyorum) araştırmalarla devam edilmiştir. Elde edilen gelişmelere rağmen yine de bu alt-çalışmaların ne zaman sonuçlanacağı için tabiyatından ötürü belirsizdir.

İleriye dönük olarak yapılması gereken araştırmalar ise şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Termomekanik kenetleme tamamlanmalıdır.
Bu konuda Sayın Çınar Gerçek yüksek lisans tezini tamamlamak üzeredir.
- Yetmezlik kriterleri tamamlanmalıdır.
Bu konuda Sayın Mustafa Usta doktora çalışmalarına devam etmektedir.
- Ağ yenileme konusundaki özgün fikirler geliştirilmeli ve uygulanmalıdır.
Sayın Sebahattin Kavaklı bu konuda doktora çalışması çerçevesinde çalışmalarına devam etmek istemektedir.
- Sonlu eleman yöntemiyle kenetlenmiş biçimlendirme işlemlerinin optimizasyonunu sağlayan ek algoritmalar.
Bu konuda da Sayın Abdullah Şen doktora çalışmalarına başlamıştır.
- Yazılım paralel işlemcili iş-istasyonları için modifiye edilmelidir. Bu şekilde sayısal benzetim hızı bir kaç mertebe artabilecektir.
- Yazılımın mevcut mimarisi modernleştirilmeli.
Bu konuda Sayın Besim Baranoğlu yüksek lisans tezini yürütmektedir.
- Yazılımın tam bağımsız olması için ticari grafik paketlerinden ziyade, özgün bir grafik paketi geliştirilmelidir.

KAYNAKÇA

Altan, T.; Knörr, M.: *Anwendung des FEM-Programms DEFORM in der Massivumformung*. In: Tagungsband "Neuere Entwicklungen in der Massivumformung". Düsseldorf:DGM-Verlag, 1991, S. 202 -226.

Çapan, L.: *Metallere Plastik Şekil Verme*. İstanbul: Çağlayan Kitapevi, 1990.

Desai, C.S.; Abel, J.F.: *Introduction to the Finite Element Method*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1972.

DIN 8580: *Begriffe der Fertigungsverfahren; Einteilung*, Baskı Haziran 1974.

Gallagher, R.H.: *Finite Element Analysis: Fundamentals*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.

Geiger, R.; Schätzle, W.: *Grundlagen und Anwendung des Querfließpressens*. Symposium Fundamentals of Metal Forming Technique. 13 - 14 Kasım 1983, Stuttgart, Proceedings, Vol. II, S. 139-160.

Gerhardt, J.: *Mechanische und thermische Simulation dreidimensionaler Umformvorgänge*. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Nr.101. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo: Springer 1988.

Hallquist, J. O.: *LS-DYNA3D, Vers 910, User's Manual: Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore/USA, 1991.

Herrmann, M. (Ed.): *Tagungsunterlagen Workshop des Gemeinschaftsprojekts Prozeßsimulation Umformtechnik (PSU)*. Hannover/Almanya, 5 - 6 Aralık 1991.

Herrmann, M.; Krapoth, A.; Ruf, A.; Keck, P.: *Benchmark Definitions and Major Results*. Proceedings of the International Conference and Workshop on Metal Forming Process Simulation in Industry, Baden-Baden/Almanya, 28 - 30 Eylül 1994.

Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford: Clarendon Press, 1985 (yeni baskı).

Huebner, K.H.; Thornton, E.A.: *The Finite Element Method for Engineers*. New York: John Wiley & Sons, 1982.

Hughes, T.J.R.; Winget, J.: *Finite Rotation Effects in Numerical Integration of Rate Constitutive Equations Arising in Large-Deformation Analysis*. Int. J. Num. Meth. Engg., 15 (1980), S. 1862 - 1867.

Ismar, H.; Mahrenholtz, O.: *Technische Plastomechanik*. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1979.

Kachanov, L.M.: *Fundamentals of the Theory of Plasticity*. Moskau: MIR Publishers, 1974.

Kavaklı, S.: *Finite Element Simulation of Metal Forming Processes with Automatic Remeshing*, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1995, yayınlanmak üzere.

Lange, K. (Ed.): *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Vol. 1: Grundlagen, 2nd Edition, Berlin: Springer-Verlag, 1984.

Lange, K. (Ed.): *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Vol. 2: Massivumformung, 2nd Edition, Berlin: Springer-Verlag, 1988.

Lange, K. (Ed.): *Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Vol. 3: Blechumformung, 2nd Edition, Berlin: Springer-Verlag, 1990.

Lee, C. H.; Kobayashi, S.: *New Solution to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method*. Trans. ASME, Ser. B, J. Engg. Ind. 95 (1973), S. 865 - 873.

Li, G.; Wu, W.-T.; Tang, J.: *DEFORM-3D: A General Purpose 3-D Finite Element Code for the Analysis of Metal Forming Processes*. Proceedings of the International Conference and Workshop on Metal Forming Process Simulation in Industry, Baden-Baden/Germany, 28 - 30 Eylül 1994, S. 283 - 301.

Lung, M.: *Ein Verfahren zur Berechnung des Geschwindigkeits- und Spannungsfeldes bei stationären starr-plastischen Formänderungen mit finiten Elementen*. Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Hannover, 1971.

Malvern, L.E.: *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1969.

Markov, A.A.: *On Variational Principles in the Theory of Plasticity*. Mehkanika, 11 (1947), S.339-350.

McMeeking, R.M.; Rice, J.R.: *Finite-Element Formulations for Problems of Large Elastic-Plastic Deformation*. Int. J. Solids Structures, 11 (1975), S.601-616.

Nagtegaal, J.C.; de Jong, J.E.: *Some Aspects of Nonisotropic Workhardening in Finite Deformation Plasticity*. In: Proceedings of the Workshop on Plasticity of Metals at Finite Strain. E.H. Lee und R.L. Mallett (Hrsg.), Stanford University, Stanford, 1981, S.65-102.

Park, J. J.: *Application of the Finite Element Method to Metal Forming Problem*. Ph.D.-Thesis, University of California, Berkeley, 1982.

Ramm, E.: *Geometrisch nichtlineare Elastostatik und Finite Elemente*. Habilitationsschrift. Universität Stuttgart, 1976.

Rebello, N.M.R.D.S.: *Finite Element Modeling of Metalworking Processes for Thermo-Viscoplastic Analysis*. Ph.D.-Thesis, University of California, Berkeley, 1980.

Roll, K.: *Einsatz numerischer Näherungsverfahren bei der Berechnung von Verfahren der Kaltmassivumformung*. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Nr.66. Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1982.

Schneiders, R.; Oberschelp, W.; Kopp, R.; Becker, M.: *New and Effective Remeshing Scheme for the Simulation of Metal Forming Processes*. Engineering with Computers, 8 (1992), S. 163-176.

Simo, J.C.: *Maximum Plastic Dissipation and the Multiplacative Decomposition in Finite Strain Plasticity*. In: Proc. Int. Conf. "Computational Plasticity", Pineridge Press, Swansea 1987, S. 1821-1835.

Şavkılıoğlu, M.: *Finite Element Simulation of Metal Forming Processes with a Linear 3-D Contact Algorithm*, ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, yürütülmekte olan bi yüksek lisans çalışması, 1995.

Tekkaya, A. E.; Şen, A.: *Linear Contact Algorithm for Rigid-Plastic Finite Element Simulation*, Steel Research, 63 (1992) 12, S. 531-536.

Tekkaya, A. E.: *Sonlu Eleman Yöntemiyle Üretim İşlemlerinin Sayısal Benzetimi*, AFP-03-02-DPT-91K-121490 nolu Araştırma Projesi Nihai Raporu, Ankara, 1993.

Tekkaya, A. E.; Kavaklı, S.; Şavkılıoğlu, M.: *Rigid-Plastic Finite Element Modelling of Three-Dimensional Bulk-Metal Forming Processes*, **International Conference and Workshop on Metal Forming Process Simulation in Industry**, Baden-Baden/Almanya, 28 - 30 Eylül 1994. Vol. I, S. 60-79.

Zienkiewicz, O. C.; Valliapan, S.; King, I. P.: *Elasto-Plastic Solutions of Engineering Problems 'Initial Stress' Finite Element Approach*. Int. J. Num. Meth. Engg., 1 (1969), S. 75 - 100.

Zhong, Z.; Nilsson, L.: *A Contact Searching Algorithm for General 3-D Contact-Impact Problems*. Computers and Structures, 34 (1990) 2. S. 327-335.

EK: UYGULAMA ÖZETİ

Uygulayıcı Kurumumların Bilgisine:

MODİSA-11 nolu proje çerçevesinde metal biçimlendirme işlemlerinin sayısal benzetimini (yani, bilgisayar simülasyonunu) yapabilen bir yazılım (PLADAN: PLastik Deformasyon ANalizi) geliştirilmiştir. Yazılım sonlu eleman yöntemine dayanmaktadır. PLADAN'ın en önemli özelliği gerçek sanayi uygulamaları için kullanılabilir olması. Üç-boyutlu karmaşık dövme, ekstrüzyon, püskürtme ve yığma işlemleri çok az bir ön-bilgi gerektirerek bilgisayar üzerinde işlemin kendisi pres veya çekiç üzerinde gerçekleştirilmeden simule edebilirler. PLADAN için gerekli girdiler şunlardır:

1. *İş-parçasının başlangıç geometrisi ve kalıpların geometrileri:*

İş-parçasının ilk şekli, yani biçimlendirilmemiş şekli, genellikle basit olmaktadır (en azından ön biçimlendirme kademeleri için), örneğin, bir silindir, bir çubuk, bir küp, vb. Ancak, kalıpların geometrisi gerçek sanayi uygulamalarında oldukça karmaşık olabilmektedir. Bu geometriler için gerekli veriler bir ASCII-kütüğü ile hazırlanabilmesine rağmen, bu işlemin bir CAD ya da sonlu eleman ön-işlemcisi (*FEM Preprocessor*) ile yapılması önemle önerilmektedir. PLADAN şu anda ASKA-Mesh/View ve FEMGEN/FEMVIEW isimli ön-işlemcilerin yarattığı verileri algılayabilmektedir. Başka CAD ve/veya sonlu eleman ön-işlemcileri için kullanıcılar tarafından bir ara yazılım hazırlanmalıdır.

2. *İş-parçasının malzeme özellikleri:*

PLADAN rijit-plastik malzeme kanununa dayanılarak hazırlanmıştır. Sonuç olarak, malzeme özelliği çekme deneyinden elde edilen akma eğrisi (gerilme-plastikgenleme eğrisi) ve ilk akma gerilmesinden oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıkta yapılan bir dövme işlemi için ilgili sıcaklıktaki akma eğrisi yeterlidir. PLADAN'ın mevcut sürümü isothermal hesaplamalar yapabilmektedir; termomekanik kenetlenme modülü Mart 1996'da hizmete açılması beklenmektedir.

Kalıplar rijit varsayıldığı için, kalıp malzemeleri ile ilgili bir bilgiye gerek yoktur.

3. *Sınır koşulları:*

İşlemin sayısal simülasyonu, matematiksel ve fiziksel sınır koşullarının tanımını gerektirmektedir. Bunlardan en basit olanı, kalıp hızları ve/veya kuvvetleri ve/veya enerjisidir. Ayrıca, kalıp ile iş-parçası arasındaki sürtünme de tariflenmelidir. Bu amaç için sürtünme katsayısı yeterlidir.

Matematiksel olarak ise simetri koşulları tanımlanmalıdır. Bunlar genellikle sonlu eleman ön-işlemcisi tarafından, simetri yüzeyleri tanımlandıktan sonra, otomatik olarak belirlenebilir.

4. *Sayısal parametreler:*

PLADAN'ın en büyük gücü tüm sayısal parametreleri otomatik olarak belirleyebilmesidir. Kapsamlı bir bilgi ve deneyim birikimi gerektiren bu parametrelerin tesbiti ileri aşamalarda kullanıcılar tarafından da belirlenebilir. Bu tür parametreler, eleman ağının topolojisini, hesaplama adımını büyüklüğü, dögüsel hesaplamalar için yakınsama limitlerini, sıkışmazlık hatasını, temas toleranzlarını, vb. gibi bilgileri içermektedirler.

PLADAN bu bilgiler ile şu sonuçları vermektedir:

1. Biçimlendirilmekte olan iş-parçasının herhangi bir zaman noktası için şeklini. Bu bilgi bir ASCII-veri kütüğü ile sunulmasına rağmen sonlu eleman son-işlemcileri veya CAD yazılımları ile görüntülenmesinde büyük yarar vardır. PLADAN şu anda ASKA-Mesh/View ve FEMGEN/FEMVIEW isimli son-işlemcileri için veri bankaları üretmektedir.
2. Biçimlendirilmekte olan iş-parçasının herhangi bir zaman noktası için gerilme ve genleme dağılımlarını. Bunların görüntülenmesi için de yukarıda belirtilen ek yazılımlara gereksinim vardır.
3. Biçimlendirme kuvveti, enerjisi ve yolu.

PLADAN ANSI-C dilinde yazılmıştır ve DOS, UNIX, LINUX vb. işletim sistemleri üzerinde sorunsuz çalışmaktadır. Dolayısıyla, C-derleyecisi bulunan herhangi bir donanım ortamında PLADAN kullanılabilir. Geliştirmeler sırasında iş istasyonlarından Silicon Graphics (INDIGO), Hewlett Packart (HP 720), Digital (DEC 5000/240), IBM (Powerserver 590); kişisel bilgisayarlardan ise 80486 (DOS, LINUX) işlemcili PC'ler üzerinde kapsamlı denemeler yapılmıştır. Büyük karmaşık problemler için hızlı iş istasyonları önerilirken, PENTIUM 100 MHz'lik PC'ler ile de birçok simülasyonu yapmak mümkün görülmektedir. Örneğin, PENTIUM 100 MHz'lik bir donanım ile orta boy bir problemin simülasyonu takriben 2 ile 4 saat arası sürmesi beklenmektedir.

Uygulama için TÜBİTAK tarafından alınması gereken önlemler:

Yazılımın uygulamaya dönüştürülebilmesi için TÜBİTAK tarafından alınması gereken tek bir önlem vardır: Yazılımı yaşatacak bir uzman veya uzmanlar ekibinin oluşturulması. Yazılımın yaşamasından şunlar kastedilmektedir:

1. Yazılıma zaman içinde kuramsal olarak eklemeler yapılmalıdır.
2. Yazılım yeni çıkacak donanımlara adapte edilmelidir.
3. Kullanıcılara kullanım desteği sağlanmalıdır.
4. Başka CAD ve/veya sonlu eleman ön/son-işlemcileri için ara-yazılımlar hazırlanmalıdır.
5. Hala mevcut olabilecek programlama hataları temizlenmelidir.

Bunları ancak bir uzmanlar grubu sağlayabilir. Bu uzmanlar grubu, örneğin benim yönetimindeki bir veya iki araştırma görevlisinden oluşabilir.

BİBLİYOGRAFİK BİLGİ FORMU	
1- Proje No: MODISA-11	2- Rapor Tarihi: 31 Mayıs 1995
3- Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1/8/1992 - 31/1/1995	
4- Projenin Adı: Sonlu Eleman Yöntemiyle Üretim İşlemlerinin Sayısal Benzetimi.	
5- Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Prof.Dr. A.Erman Tekkaya Mak.Müh.Sebahattin Kavaklı Mak.Müh.Murat Şavkılıoğlu	
6- Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, 06531 Ankara	
7- Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: ---	
8- Öz (Abstract): Projenin amacı metal biçimlendirme işlemlerinin sayısal benzetimini yapabilen bir sonlu eleman yazılımının geliştirilmesidir. Yazılımın yerel sanayide kullanılabilmesi için güvenilir, hızlı ve geniş bir donanım platformunda çalışabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle malzemenin bünye denklemleri rijit-plastik olarak seçilmiştir. Bünye denklemleri Levy-Mises akma kuralı, v. Mises akma kriteri ve pekişmeyi tarifleyen akma eğrisi kullanılarak oluşturulmaktadır. Sayısal çözüm ise Markov değişim ilkesinin ayrıklaştırılmasına dayanmaktadır. Elde edilen doğrusal olmayan sonlu eleman denklemleri doğrudan yenileme ile Newton-Raphson yöntemleri kullanılarak çözümlenmektedir. Tamamıyla otomatik olarak çalışan ağ-yenileme algoritması, doğrusal temas algoritması ve Newton-Raphson stabilatörü özgün kurumsal katkılar olarak sunulmaktadır. Sonlu eleman programı ANSİ-C dilinde yazılmıştır. Pre-ve postprosesör olarak ASKA-Mesh/View ticari yazılımı kullanılmaktadır. Geliştirilen yazılım, doğruluğu kanıtlanmış çözümler ile sınanmıştır. Ayrıca son derece karmaşık sanayi örnekleri çözülmüş ve raporun son bölümünde tanıtılmıştır.	
Anahtar Kelimeler: Metal Biçimlendirme, Sonlu Eleman Yöntemi	
9- Proje ile ilgili Yayın/Tebliğlerle ilgili Bilgiler 1 Ulusal Tebliğ, 3 Uluslararası Tebliğ, 1 Uluslararası Dergi (kabul aşamasında)	
10- Bilim Dalı: Doçentlik B. Dalı Kodu: 625.03.00 Uzmanlık Alanı Kodu: ISIC Kodu:	
11- Dağıtım (*): <input type="checkbox"/> Sınırlı <input checked="" type="checkbox"/> Sınırsız	
Türk Dövme Sanayi, Altaş, İzeltaş, Kanca, Parsan, Omtaş, Kulekalıp	
12- Raporun Gizlilik Durumu: <input type="checkbox"/> Gizli <input checked="" type="checkbox"/> Gizli Değil	

(*) Projenizin Sonuç Raporunun ulaştırılmasını istediğiniz kurum ve kuruluşları ayrıca belirtiniz