

# DERİN ÇEKME İŞLEMİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR METODU YARDIMIYLA MODELLENMESİ

**Hasan YILDIZ, Onur KIRLI**

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 35100-Bornova/İzmir

Geliş Tarihi : 20.11.2003

## ÖZET

Derin çekme yoluyla şekillendirme işlemi, değişik sektörlerde kullanılan soğuk şekillendirme yöntemlerinin başında gelir. Bu yöntemde karşılaşılan problemlere bilgisayar destekli çözümler üretmek hem zaman hem de para kaybını önleyecektir. Bu çalışmada kompleks geometriler içeren kalıp yüzeylerinde, çelik sac malzemesinin ne doğrultuda akacağı ve şekillendirme esnasında incelenen sacın yırtılma, buruşma ve benzeri şekil hatalarının; kalıp tasarımı aşamasında önceden görülüp önlem alınması, tasarım değişikliklerinin sonuçlarını kalıp imal edilmeden öngörülebilmesi için yapılması gerekenler incelenmiştir. Bu çalışmada problemlerin çözümü için eksplicit doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu seçilmiştir. Seçilen doğrusal olmayan malzeme ve temas modelleri önce bir örnekle karşılaştırılarak modelin doğruluğu irdelenmiştir. Ayrıca uygulamaya yönelik bir örnek üzerinde kalıp tasarımı adım adım yapılmıştır. Metodun kullanılması sonucunda elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Soğuk şekillendirme, Derin çekme, Doğrusal olmayan analiz, Sonlu elemanlar yöntemi

## NON-LINEAR FINITE ELEMENT MODELING OF DEEP DRAWING PROCESS

### ABSTRACT

Deep drawing process is one of the main procedures used in different branches of industry. Finding numerical solutions for determination of the mechanical behaviour of this process will save time and money. In die surfaces, which have complex geometries, it is hard to determine the effects of parameters of sheet metal forming. Some of these parameters are wrinkling, tearing, and determination of the flow of the thin sheet metal in the die and thickness change. However, the most difficult one is determination of material properties during plastic deformation. In this study, the effects of all these parameters are analyzed before producing the dies. The explicit non-linear finite element method is chosen to be used in the analysis. The numerical results obtained for non-linear material and contact models are also compared with the experiments. A good agreement between the numerical and the experimental results is obtained. The results obtained for the models are given in detail.

**Key Words :** Cold metal forming, Deep drawing, Non-Linear analysis, The finite element method

### 1. GİRİŞ

Soğuk şekillendirmenin bir tipi olan derin çekme işlemi, otomotiv sektörü başta olmak üzere değişik sanayi sektörlerinde çok yaygın kullanılan bir işlemdir. Bu işlemde kullanılan temel araçlardan biri

kalıptır. Kalıplar ve kalıpcılık teknikleri ampirik metotlara dayalı, deneysel çalışmaları gerektiren yüksek maliyetli, bir yöntemdir. Bu nedenle derin çekme işlemiyle üretilmesi planlanan parçanın ve kullanılacak kalıbın özelliklerinin önceden belirlenmesi hem maliyet, hem zamandan tasarruf sağlayacaktır.

Mevcut kalıp simülasyon yöntemlerinin başında sac açılım yöntemi gelir. Bu yöntemde işlem tek basamakta yapılır. Şekillendirilmiş sac parça geometrisi referans alınarak, parça üzerindeki her noktanın şekillendirme sırasında ne kadar yer değiştirdiği hesaplanır ve bu değerlerden gerilme ve diğer bileşenler elde edilir. Doğrusal bir yaklaşım olan bu yöntem hızlı sonuç vermesine rağmen hiçbir ara adım ve diğer kalıp parçalarını içermediğinden elde edilen sonuçlar ekspilisit metoda göre daha az gerçekçidir.

Literatürde benzer çalışmalarda farklı doğrusal olmayan yaklaşımlar içeren çözümlere rastlanmıştır. Mamalis et al., (1997a, b), silindirik ve kare kapların şekillendirilmesinde malzemenin etkisini ve form karakteristiklerini, ekspilisit sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir (Anon., 2001)

Sünek malzemelerin derin çekme işlemlerindeki kırılma davranışlarıyla ilgili bir çalışma Takuda et al. (1997) tarafından yapılmış, sonlu elemanlar analizleri yardımıyla kırılma bölgesinin gelişimi belirlenmeye çalışılmıştır. Kawka et al. (1998), sac şekillendirme prosesini çok basamaklı statik ekspilisit sonlu elemanlar yöntemi ile (ITAS3D programı yardımıyla) incelemiştir. Rojek et al. (1998), ekspilisit sonlu elemanlar yönteminin sıcaklık etkileri de göz önünde bulundurularak (Stampack programı yardımıyla) sac şekillendirmeye uygulanmasını incelemiştir.

Bir grup araştırmacı (Kutt et al., 1999) derin çekme işlemlerinde bir problem olarak karşılaşılan, derin çekme aşamasında malzemelerdeki geri dönüşüm davranışını doğrusal olmayan sonlu elemanlar analiz yöntemiyle incelemiştir. Cho et al. (2002), kalınlık doğrultusundaki gerilmelerin derin çekme işlemine etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada temas kavramı kabul elemanlarıyla birlikte kullanılmıştır. İmpilisit sonlu elemanlar yöntemi derin çekme işleminde etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Boogaard et al., 2003).

İncelenen bazı yöntemlerde; kompleks geometrilerin ağ yapısının oluşturulmasında, otomotiv sektörüne özgü yazılımlar kullanılmadığından birçok kabul ve modelleme basitleştirilmesi içermektedir. Bu çalışma içeriğinde en az veri kaybı ile ağ oluşturulması ve ağ dosyasının analiz yazılımına aktarılması ile ilgili detaylar da irdelenmiştir. Ayrıca diğer araştırmalarda gözlenen başka bir eksik ise kalıplılık ile ilgili paket programların kullanıcıyı sınırlamakta olmasıdır. Bu yüzden çalışmada daha esnek bir yöntem izlenmiş birçok farklı programdan çeşitli veriler derlenip çözücü yazılımda birleştirilmiştir.

Bu çalışmada doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak derin çekme işleminin benzetimini yapmak ve bu işlem sırasında ortaya çıkabilecek problemleri önceden tespit edip uygun çözümler getirmek hedeflenmiştir. Bu kapsamda ekspilisit sonlu elemanlar yöntemi, temas modeliyle birlikte, doğrusal olmayan malzeme özellikleri de hesaba katılarak kullanılmıştır.

## 2. SACLARIN PLASTİK ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ

Metal şekillendirme işlemleri arasında en çok problem yaşanan işlem derin çekmedir. Plastik şekillendirme işlemleri için bazı tablolar hazırlanmıştır. Bu tablolar ampirik metotlarla hazırlandığından yalnızca deney malzemesinin kullanıldığı uygulamalarda işe yaramakta ve malzemenin iki boyutta aktığı kabulü ile oluşturulmaktadır. Karışık geometrilere sahip parçaların soğuk şekillendirilmesinde bu veriler yetersiz kalmaktadır. Karışık yüzeylere sahip her parça için defalarca denemeler yapılmakta, kalıp tasarımı değiştirilip istenen ürün elde edilene kadar deneme yanılma yolu ile sonuca ulaşılmaya çalışılmaktadır. Sacda meydana gelen buruşmalar, pot çemberine açılan kilit bölgeleri ile engellenmeye çalışılmaktadır. Kilitlerin yeri ve miktarı da denemelerle belirlenmektedir. Ayrıca kalıplar üzerinde yapılan kaynak işlemleri kalıpta kalıcı iç gerilmeler oluşturmakta, kalıbın ömrünü kısaltmaktadır. Bu işlemlerin tümü üretim maliyetini yükseltici işlemlerdir.

## 3. PLASTİSİTE

Plastisite teorisinde plastik deformasyon şu özelliklere sahiptir:

- Şekil değişim hızına bağlı plastik deformasyon, birim şekil değiştirme değerinde ilave bir bölünme oluştuğunu kabul eder.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

veya diferansiyel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (2)$$

Burada;  $\dot{\epsilon}_{ij}$ ,  $\dot{\epsilon}_{ij}^e$  ve  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  sırasıyla, toplam, elastik ve

plastik birim şekil değişim hızlarıdır.

- Plastik deformasyon yola bağlıdır. Plastik deformasyon esnasında gerilme ve birim şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Bu yüzden plastik deformasyonun kurulum ifadeleri diferansiyel denklemlerle veya artırım ifadeleri ile oluşturulmalıdır (orandan bağımsız plastisite dahil).

En temel plastisite kurulum denklemi şu şekilde yazılabilir (Hill, 1950):

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl}(\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^p) \quad (3)$$

veya diferansiyel ifadesi

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}(d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p) \quad (4)$$

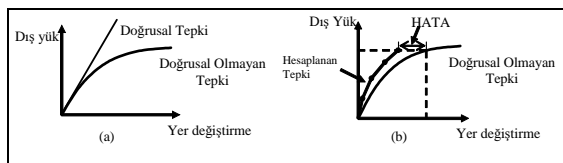
şeklinde olur. Burada  $D_{ijkl}$ , malzeme özellik matrisidir.

## 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt bölgelere (problemlere) ayrılarak, her birinin kendi içinde çözülmesiyle tüm çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Bu çalışma içeriğinde, plastik şekillendirmeyi incelemek için sonlu elemanlar yöntemi seçilmiştir. Bu seçimin nedenleri arasında, bu yöntemin çok farklı malzeme ve çok çeşitli temas tanımlama imkanları sunması vardır. Böylece şekillendirme işleminin doğasını oldukça fazla değişken ile benzetim yapma imkanı sağlanmış olur.

### 4. 1. Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Yöntemi

Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde, yükleme, katılıkta belirgin etki yaratınca yük-deformasyon eğrisi doğrusal olmayan bir şekil alır (Şekil 1). Doğrusal olmayan yer değiştirmenin etkisi, doğrusal denklem sistemleri bir araya getirilerek oluşturulabilir (Şekil 2).

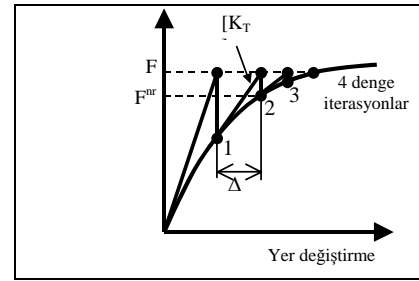


Şekil 1. (a) Doğrusal ve (b) doğrusal olmayan tepki yaklaşık hesapları

Bir yaklaşım; uygulanan dış yükü artış serilerine bölüp, her artışın sonunda katılık matrisini baştan düzenlemektir. Bu yaklaşımdaki problem; biriken hataların sonucun dengesini bozacak miktara gelme riskidir (Şekil 2). Newton-Raphson algoritması bu konuda bir çözüm sunar (Şekil 3).Yük kademeli olarak uygulanır. Ayrıca eşitlikteki denge, artış iterasyonları ile korunmaya çalışılır.

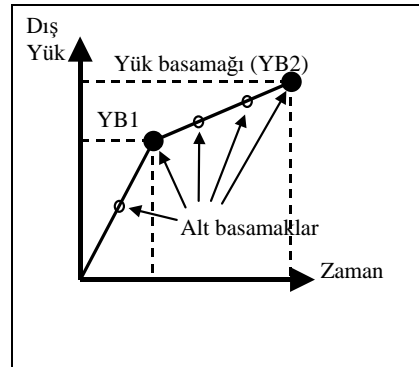
$$[K_T]\{\Delta u\} = \{F\} - \{F^{nr}\} \quad (5)$$

burada  $[K_T]$ , tanjant katılık matrisi,  $\{\Delta u\}$ , yer değiştirme artırımları,  $\{F\}$ , dış yük vektörü ve  $\{F^{nr}\}$  ise iç kuvvet vektörünü göstermektedir. İterasyon,  $\{F\} - \{F^{nr}\} = \epsilon$  eşitliği sağlanana dek sürer. Burada  $\epsilon$  tolerans değeridir.



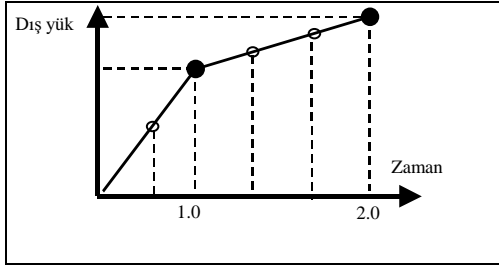
Şekil 2. İterasyon yaklaşımı

Bu proses dış yükün tamamı uygulanana kadar sürdürülür. Bir veya daha çok yük basamağı sınır şartı olarak verilebilir. Böylelikle çok sayıda alt basamak ve iç içe geçmiş yükleme durumları oluşacaktır (Şekil 3).



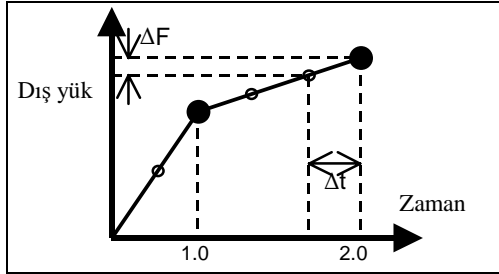
Şekil 3. Yük basamakları

Dengeyi sağlamak için yapılacak iterasyonlar yüklemenin doğrusal olmayan bir şekil almasını her zaman sağlayamayabilir. Her yük ve alt basamak bir zaman basamağı (Şekil 4) ile ilişkilidir. Zaman statik analizlerde bir sayacıdır, kronometre değeri değildir. Oran artırımlı analizlerde zaman değeri örneğin; yer değiştirme miktarı olarak verilebilir, böylece yük ve çekme eğrisi elde edilmiş olur.



Şekil 4. Zaman basamakları

Her basamak değişimi arasındaki  $\Delta t$  zaman aralığını; zaman basamağı veya zaman adımı olarak ifade edilebilir. Zamandaki yük artış  $\Delta F$ , daha büyük bir yük artışı  $\Delta F$  doğurur (Şekil 5). Böylece zaman adımının değişimi sonuca direkt etki eder. Sonlu elemanlar paket programları zaman artışı  $\Delta t$  değerinin ne olması gerektiğini girdilerden hesaplayan algoritmalar içerir.



Şekil 5. Yük ve zaman değişimi

Zamana bağlı genel sonlu elemanlar genel hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılır (Hughes,1987).

$$(M + \alpha \Delta t K)v_{n+1} = F_{n+1} - Kd_{n+1} \quad (6)$$

Eğer bu ifadede  $\alpha = 0$  alınır, yani  $M$  kütle matrisi "topaklanmış" formda kullanılırsa, eşitliğin çözümü için matris işlemlerine gerek kalmayacaktır. Bu durumda ifadenin çözüm metodu ekspilisit olarak adlandırılır.

Metal şekillendirme, sonlu elemanlar yönteminin bir alt başlığı sayılabilecek ekspilisit yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir.

Ekspilisit iterasyon birçok sonlu elemanlar çözüm yönteminden çok daha hızlı çözüme ulaşır. Bu yüzden çok eleman içeren ve zaman basamağı sık doğrusal olmayan problemlerde tercih edilir. Sonuçların tutarlılığı yapılan kabullere bağlı olmasına rağmen, genelde gerilmeden ziyade, yer değiştirme sonuçları istenen problemlerde tercih edilir.

Bu metod doğrusal değişen yer değiştirme kabulüne dayanır. Temel hareket denklemi zamana göre

ilerletilirse,  $t_n$  anında bu denklem şöyle oluşur:

$$[M]\{\ddot{u}_n\} + [C]\{\dot{u}_n\} + [K]\{u_n\} = \{F_n^a\} \quad (7)$$

İvme ve hızın zamana bağlı denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad (8)$$

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (9)$$

Böylece,  $t_{n+1}$  anında bilinmeyen yer değiştirmelerin çözülebileceği denklem sistemi alttaki gibidir.

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{2}{\Delta t}[C]\right)\{u_{n+1}\} = \{F_n^a\} - ([K] - \frac{2}{\Delta t^2}[M])\{u_n\} - \left(\frac{1}{\Delta t^2}[M] - \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{u_{n-1}\} \quad (10)$$

Kütle matrisini iki farklı tipte ifade etmek mümkündür; dağılmış (consistent) kütle matrisi ve topaklanmış, yığılmış (lumped) kütle matrisi.

Bir yığın kütle matrisi yaratmak için her elemanın kütlesi hesaplanıp o elemanın düğüm sayısına bölünerek elde edilen sonuçlar bir köşegen matrise yerleştirildiğinde yığın kütle matrisi elde edilmiş olur. Bu yöntem dışında da yığın kütle matrisi elde etme yöntemleri mevcuttur.

Ekspilisit zaman integrasyon metodunda tutarlı kütle matrisi kullanılmaz. Yerine topaklanmış kütle matrisi kullanılır.

Eğer  $[M]$  kütle matrisi topaklanmış kütle matrisi ise ve  $[C]$  matrisi de kütle matrisinden orantılanarak türetilmiş sönümlenme matrisi olarak alınırsa, ekspilisit zaman integrasyonu oldukça başarılı sonuçlar verecektir. Çünkü denklem sistemi birbirinde bağımsız denklemlerden oluşacaktır.

Ekspilisit yönteminde avantajları şu şekilde sıralanabilir:  $[K]$  katılık matrisini değiştirmeye gerek yoktur, çözülmesi gereken denklem sistemleri yoktur, bilgisayar işlemlerinde daha az bellek kullanılır, her zaman basamağı için daha az analizle uğraşılır, doğrusal ve doğrusal olmayan çözüm ayrımı yoktur.

Ekspilisit analiz prosedüründe en çok süreyi ve işlemi elemanların işlenmesi alır. Bu yüzden hızlı eleman formülasyonları gereklidir. Elemanlardaki integrasyon noktalarının miktarı toplam CPU zamanını direkt etkiler. Bu yüzden indirgenmiş elemanlar kullanılır.

## 5. MALZEME TANIMLARI VE ÇEŞİTLERİ

Ekspilisit analizlerde birçok farklı malzeme tipleri mevcuttur. Neredeyse doğadaki her uygulamada yer alan malzemeler sonlu eleman analizlerinde modellenilebilmiştir.

Bu çalışmanın araştırma hazırlığı esnasında birçok farklı sonlu elemanlar yazılımlarının malzeme tanımları incelenmiştir. Genelde paket programlar benzer malzeme kütüphanelerine sahiptirler. Çalışma içeriğinde ANSYS/LS-DYNA yazılımının içerdiği malzeme modelleri irdelenmiştir. Bu yazılımın malzeme tanımları çok değişkenlidir. Doğrudan deney verilerini kullanarak tanımlamalar da yapılabilmektedir.

Özellikle ekspilisit yazılımların içerdiği malzeme modelleri şunlardır;

- Birim şekil değiştirme oranına bağlı plastisite modelleri.
- Sıcaklığa duyarlı plastisite modeli.
- Gerilme ve birim şekil değiştirme hasar kriterini içeren modeller.
- Boş malzeme modelleri (hareket başlangıçlarını veya uçak türbinine giren kuş gibi ani darbeleri simüle etmek için)
- Çok değişkenli malzeme özellikleri içeren durum denklem modelleri

Birçok malzeme modeli yoğunluk, elastisite modülü, Poisson oranı dışında gerilme-birim şekil değiştirme tabloları, yük eğrileri, akma sınırı ve plastik şekil değiştirmeyle ilgili tablolar içermektedir. İstenen bu veriler malzeme tanımlanmadan önce vektör, matris yada eğri denklemi olarak yazılıma tanıtılır.

Bu çalışmada şekillenecek sac parçaları dışındaki tüm parçalar rijit olarak ele alınmış, şekillenecek sacların plastik davranışı için birim şekil değiştirme oranına bağlı parçalı doğrusal yaklaşımı kullanılmıştır. Bu malzeme modelinin seçilmesinin nedeni, soğuk şekil değişimleri için ideal bir malzeme modeli olmasıdır (Kırıl, 2003).

## 6. DERİN ÇEKMEDE TEMAS MODELLENMESİ

ANSYS/LS-DYNA yazılımında temas elemanları yerine temas yüzeyleri kullanılır. Modellerin bir parçasının dış yüzeyinin diğer bir parçanın içine girmesi teması doğurur. Temas elemanları

kullanılmadığı için temas edecek bölgeleri önceden tanımlamak gerekmez. Eleman ağının özelliklerinde temas katılığı tanımlamak gerekmez. Temas tanımı için birbiri ile temas edecek parçaları tanıtmak, temas tipini belirlemek ve temas tipi ile ilgili istenen parametreleri girmek yeterlidir.

Kullanılan programda 22 farklı temas tipi mevcuttur. Bu da yüzeyler arası çok geniş etkileşim imkanı sağlar. Hangi temas tipinin fiziki modeli en iyi yansıtacağına karar vermek zordur. Temas tipinin seçimini yapabilmek için değişik temas algoritmalarını ve mevcut temas ailelerinin içeriğini bilmek gereklidir. Bu çalışmada, birçok temas tanımı denenmiş ve en başarılı sonuç şekillendirme temasında elde edilmiştir. Çalışmanın devamında yapılan analiz örnekleri, şekillendirme teması ile gerçekleştirilmiştir.

Şekillendirme temas tipleri; düğüm noktası ile yüzey şekillendirme teması, yüzey ile yüzey şekillendirme teması ve tek yönlü yüzey ile yüzey şekillendirme teması şeklindedir ve metal şekillendirme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu temas tipinde kalıplar ve yardımcı elemanlar hedef yüzey olarak tanımlanır, iş parçası olan sac ise temas yüzeyi olarak tanımlanır. Ağ yapısının sürekliliği ve kendi içinde bütünlüğü bu temas tipi için zorunlu değildir, böylece temas özellikleri sistemin karmaşıklığını azaltmaktadır. Kalıp elemanlarının yüzey normaleri aynı doğrultuda olmalıdır. Şekillendirme temasının ayarları otomatik temas tiplerine dayandığından oldukça sağlıklı sonuçlar elde edilir.

## 7. DERİN ÇEKME İLE SOĞUK ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Bu çalışmada iki farklı parça için birçok değişik analiz gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki (bağlantı dirseği) modellenmenin güvenilirliğini sınamak amacı ile incelenmiştir. İkinci parça (taşıyıcı süspansiyon desteği) ideal kalıp tasarımının elde edilmesi amaçlı bir pilot çalışma olarak incelenmiştir.

Geometrik modellerin (üç boyutlu geometriler) oluşturulması CATIA V4.2.1 programında gerçekleştirilmiştir. Kalıp elemanları dahil tüm sistem yüzey olarak modellenmiştir. Parçalar sisteme yerleştirilirken et kalınlıklarının değeri ve doğrultusuna dikkat edilmiştir. Parçalar arasında olması gereken en az boşluk bırakılmış, böylece işlem süresinin gereksiz uzaması engellenmiştir.

Kalıp sistemi sırasıyla yukarıdan aşağıya; dişi kalıp, sac, pot çemberi ve erkek kalıptan oluşmaktadır. Kalıpcılıkta birçok hareketlendirme uygulaması söz konusudur. Çalışma içeriğinde uygulanan yöntemde; dişi sabit kalırken, pot çemberi, sacı dişi ile kendi arasında sıkıştırmakla erkek, sonradan pot çemberinin içinden geçerek parçayı şekillendirmektedir.

Ağ oluşumunda; parça boyutlarına, geometrideki keskin köşelerin yerleri ve dağılımlarına, en küçük kıvrım yarıçapına, işlemlerin yapılacağı bilgisayarın kapasitesine (Bellek, CPU, Disk) ve oluşturulacak elemanların dörtgen olmasına dikkat edilmiştir.

### 7. 1. Bir Bağlantı Dirseğinin Analizi

Şekil 6'da gösterilen bağlantı dirseği, bir hafif ticari aracın torpido bağlantı karkasında kullanılan bir parça olup; şekilde görüldüğü gibi kalıp sisteminde düzgün imal edilememiştir. Parçada değişiklik yapılma yoluna gidilmiştir. Torpido bağlantı dirseği parçası klasik kalıpcılık yöntemleri kullanılarak tasarlanmış, kalıp sisteminde preslenmiş ve sonuçta yırtılmalar tespit edilmiştir. Parça, sonlu elemanlar yardımıyla analiz edilerek elde edilen sonuçlar, deneysel parçanın yırtılma şekli ile karşılaştırılarak yöntemin tutarlılığı test edilecektir.

Deneysel çalışma BMC firmasının gövde üretim atölyelerinde 18 ton kapasiteli bir hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sacta yırtılma gözlemlendikten sonra bir sonraki uygulamada kalıp ve sac yüzeylerine sürtünmeyi azaltmak amacıyla yağ sürülmüştür. Fakat bu uygulamanın yırtılmaya engel olmadığı gözlenmiştir. Kalıp sisteminin hareket süreleri değiştirilerek bir dizi imalat denemesi daha yapılmış fakat yine sonuç alınamamıştır.

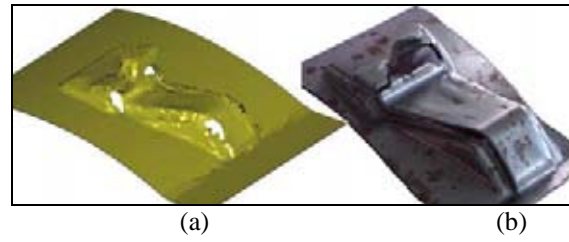
Parça geometrisi, yeniden incelendiğinde, bu işlemin "100 mm"ye yakın çekme derinliğini, çok küçük bir sac yüzeyinden ve oldukça dik bir açıda oluşturmaya çalıştığı tespit edilmiştir.

Tasarım değişikliği, çekme derinliğinin azaltılması ve yırtılan bölgedeki kalıp çıkma açısının miktarının artırılması şeklinde yapılmıştır. Yapılan değişiklikler sonrası parça imalatı hatasız bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir.

Parçada meydana gelen yırtılmalar, ekspilisit sonlu elemanlar yönteminin sınanabileceği iyi bir örnek oluşturmaktadır. Bu yüzden hatalı parçanın imal edildiği kalıplar incelenerek, ekspilisit analiz için gerekli zaman, yer değiştirme ve kalıp açıklığı verileri kalıp sistemi üzerinden alınmıştır. Ayrıca kalıp elemanlarının üç boyutlu geometrik modelleri de hazırlanmıştır.

Hem deneysel çalışmada hem de nümerik analizde parçanın köşelerinde yırtılmalar oluşmuştur. Bu bölgelerin kalınlıkları malzemenin kritik birim şekil değiştirme değerinin üstünde deforme olmuştur. Parçadaki kalınlık değişimleri ve yırtılmalarla ilgili analiz sonuçları ve deneysel çalışmanın sonuçları Şekil 6'da verilmektedir.

Şekil 6 incelendiğinde, kullanılan malzeme ve hazırlanan sonlu elemanlar modelinin, deneysel çalışmalarla çok uyumlu sonuç verdiği gözlenmiştir. Parça üzerindeki yırtılmalar hem modelde hem de üretilen parçada yakın noktalarda ortaya çıkmıştır. Bu durum, hazırlanan modelin uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Şekillendirme sonrası iş parçasının a) sayısal b) deneysel modeli

### 7. 2. Bir Hafif Ticari Aracın Süspansiyon Desteğinin Analizi

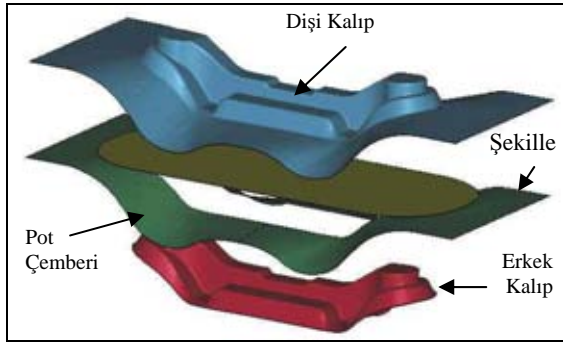
Serbest süspansiyonlu askı sistemlerinde, askı sisteminin araç şasisine bağlayan ve askı sistemi bileşenlerinin de üstüne bağlandığı parça, süspansiyon desteği adıyla adlandırılabilir. Bu parça, aracın eni doğrultusunda uzanmakta ve askı sistemi bileşenlerinin takılabileceği uzantılar içermektedir.

Bir hafif ticari araçta (Panel Van) bu parçanın 3 mm kalınlığında sacdan üretilmesi tasarlanmıştır. Parçanın soğuk şekillendirme yöntemi ile imal edilmesi sırasında ortaya çıkabilecek problemlerin önceden tespiti ve gerekli tasarım değişikliğinin kalıpların imalatından önce yapılması amaçlı bir dizi analiz çalışması yapılmıştır. Analizi yapılan tasarımlardan üç farklı örnek gösterilmiştir. Analizlerde farklı parça tasarımları, farklı kalıp tasarımları ve farklı şekillendirme parametreleri bulunmaktadır. Tüm bu değişkenler sayesinde benzer analizlerde kullanılması mümkün bazı fikirler de verilmektedir.

Yapılan çalışmalar sonrası ilk tasarım hem parça, hem de sistem bazında değişikliklere uğramıştır. Analiz sonuçlarında önerilen değişikliklere uyularak imalatına geçilmiştir.

### 7. 2. 1. Desteğin Birinci Modeli

İlk model oldukça büyük derin çekme yüksekliği içermektedir. Standart şekillendirme yöntemleri ile parçanın çalışan bölgelerinin (şekillendirme sonrası kesilip atılan kısım dışındaki bölgeler) yırtılmadan veya buruşmadan şekillendirilebilmesi oldukça zor gözükmektedir. Analiz sonuçları da şekillendirmenin bu kalıp tasarımı ile yapılamayacağını ortaya çıkarmıştır (Şekil 7). Kalıpların malzeme miktarı, ağırlıkları ve imalat (döküm, işleme vb) maliyetleri oldukça yüksektir. Bu sistemin imalatına başlamadan önce analiz yapılarak oldukça büyük bir tasarruf sağlanmıştır.



Şekil 7. Tüm kalıp sistemi

Şekillendirilecek sac parçanın kenarları sürtünmeyi en aza indirmek için ön kesme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 8). Bu sayede sac pot çemberi ve dişi kalıp arasına sıkışınca daha az bir yüzeyden ezilecek ve malzemenin akması daha rahat gerçekleşecektir (Şekil 7).

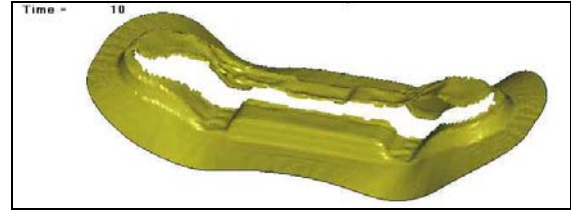
İlk örnekten farklı olarak bu pot çemberinde, erkek kalıbın hareket esnasında geçebilmesi için bir açıklık yaratılmıştır. Bu açıklık minimum eleman boyutunu da etkilemekte, modelleme süresini uzatmakta, sistemdeki eleman sayısını arttırmakta ve problemin çözümünü de uzatmaktadır. Bu işlem yerine pot çemberindeki açıklık dolu modellenip erkek kalıp ile pot çemberi arasında temas tanımlanıp yapılmadan analiz aynı tutarlılıkta gerçekleştirilebilmiştir.

Erkek kalıptan da anlaşılacağı gibi parça oldukça büyük (150 mm) derin çekme yüksekliğine sahiptir. Ayrıca parçanın yan cephelerinde kalıp açısı yetersizdir. Yırtılmada zaten bu bölgelerde başlamaktadır. Kalıp sistemi form verme değil de kesme kalıbı gibi parçayı makaslama etkisi ile yırtmaktadır.

Kalıp geometrisinde çekme derinliğinin etkisini azaltmak maksatlı kademelendirme ve açılardırma yapılmıştır. Fakat sacın yırtılması engellenememiştir. Parça şekillenirken, sac malzeme

kalıp yüzeyleri doğrultusunda akar. Şekil değiştirme için gerekli malzeme, özellikle derin çekmelerde parçanın et kalınlığının yanı sıra, sacın enine ve boyuna yer değiştirmesi ile de sağlanmaktadır.

Şekil 8'den de görülebileceği gibi, parçanın kalıp çıkma doğrultusunda, kalıp açısı yetersiz bölgelerde yırtılmalar gerçekleşmiştir. Ayrıca akan malzemenin kalıp yüzeylerine sürtünmesi sebebiyle, pot çemberinin bastığı bölgelerde buruşmalar olmuştur.



Şekil 8. Şekillendirme sonrası parçanın yırtılan ve buruşan bölgeleri

### 7. 2. 2. Desteğin İkinci Modeli

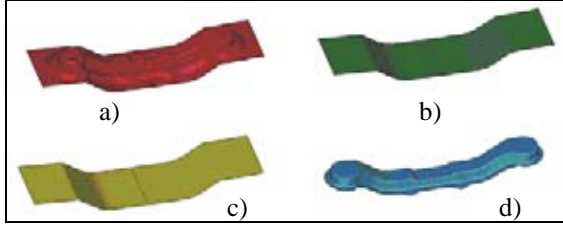
Bu modelde çekme derinliği azaltılmıştır. Kalıp tasarımında yardımcı yüzeyler mümkün olduğu kadar parçanın asıl yüzeylerine teğet gelecek şekilde oluşturulmuş keskin ve dik bağlantılardan kaçınılmıştır.

İkinci modelde işlem süresini kısaltmak ve makina performansını, analizin şekillendirme işlemine odaklamak maksatlı bazı değişiklikler de yapılmıştır. Örneğin pot çemberi formu verilmiş sac ile işleme başlanmaktadır ve pot çemberi ile erkek kalıp arasında temas tanımlanmamıştır. Ön şekil verilmiş sac (Şekil 9b), şekillendirme olayının süresini kısaltmasının yanı sıra, şekillendirme işleminin tutarlılığından da fazla ödün vermemektedir. Pot çemberi (Şekil 9c) basit bir forma sahip olduğundan, sac zaten çok az bir kalınlık değişimi ile şekillenecektir. Yalnızca az bir miktar ön gerilme ihmal edilmiş, ama gerek modelleme gerekse işlem süresi olarak zaman kısaltılmıştır.

Hareket tabloları oluşturulurken; sacı sıkıştıran pot çemberi ve dişi kalıp arası son mesafe, sacın et kalınlığı göz önünde bulundurularak yaratılmalıdır. Eğer fazla bir sıkıştırma söz konusu ise erkek kalıp (Şekil 9d), Şekil 10'da gösterildiği gibi sacın pot çemberine oturan kısımlarında yırtılmalara neden olur ve şekillendirme boyunca sac yanlardan malzeme alamaz.

Pot çemberinin hareket tablosu düzeltildikten sonra parçanın oturma yüzeylerindeki yırtılmalar tamamen kaybolmuştur. Fakat bu kalıp tasarımında da kalıp açılma doğrultusundaki çıkma açısı yetersizliğinden ve analizin ilk basamaklarında sacın kalıp içerisinde toplanması probleminin dolaylı başarısız olmuştur.





Şekil 9. a) Dişi kalıp, b) Şekillendirilecek sac, c) Pot çemberi, d) Erkek kalıp



Şekil 10. Pot çemberinin sacı fazla sıkıştırma durumu 4. saniye ve 10. saniye (analiz sonu)

Bu kalıp tasarımında kalıp elemanlarından erkek ve dişi kalıpların kesitleri, şekillenme esnasında erkek kalıp ilerlerken sacı birkaç farklı noktadan farklı hızlarla dışının içine itmeye yönelik çalışmaktadır. Bu durumda sac kalıp içerisinde buruşmaktadır (Şekil 11, 12).



Şekil 11. Sacın kalıp içerisinde buruşması 4. saniye



Şekil 12. Buruşmuş sacın şekillendirilmesi analiz sonu

### 7. 2. 3. Desteğin Üçüncü Modeli

İlk iki modeldeki eksikler bu modelde geometri

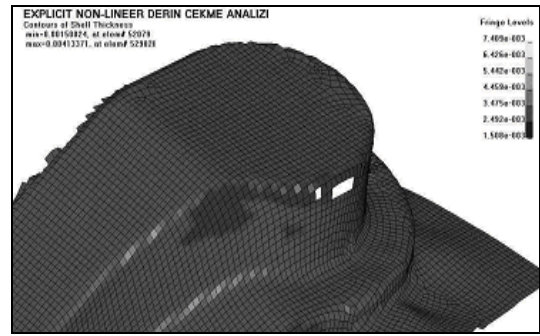
değişikliği yapılarak giderilip kullanılabilir kalıp tasarımı elde edilmiştir. Parça geometrisinin izin verdiği en yüksek kalıp çıkma açısı bu modelde yaratılmıştır. Ayrıca mümkün olan en küçük boyutlu kalıp tasarımları oluşturulmaya çalışılmıştır.

Parçanın bazı bölgeleri analizde fazla incelmeye rağmen (Şekil 13-14 ve 15), uygulamada bu bölgelerdeki kalınlık uygun bir şekilde elde edilebilmiştir (Şekil 16).

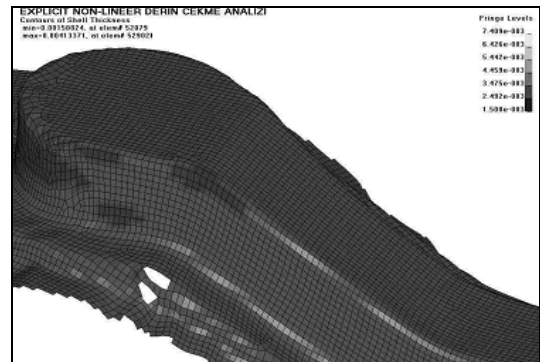


Şekil 13. Şekillendirilmiş sac

Çünkü uygulamada bilgisayarda benzetim edilemeyecek tolerans farklılıkları oluşmaktadır. Örneğin parçanın köşe bölgelerindeki kıvrımlar kalıpların imalatında 5 ila 10 mm daha derin açılmakta ve o bölgede oluşan yırtılmalar bu sayede yok olmaktadır. Ayrıca parçanın çalışan bölgelerinde hiçbir buruşma gerçekleşmemiştir. Yırtılmaya yakın bölgelere süzme kanalı koyarak lokal düzeltme de mümkündür (Şekil 16).

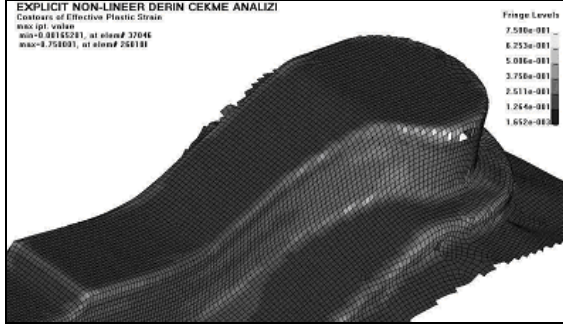


Şekil 14. Parçanın kalınlık değişimi



Şekil 15. Parçanın kalınlık değişiminin (mm) başka açıdan görünüşü





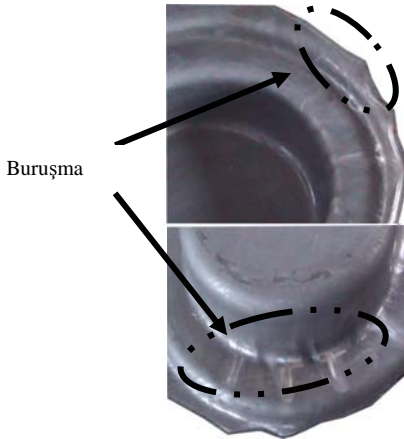
Şekil 16. Parçanın plastik birim şekil değiştirmesi

Analiz sonucunda parçanın beklenen yerlerinde buruşmalar ve yırtılmalar tespit edilmiştir (Şekil 17, 18). Bu hasarların düzeltilmesi için çalışmada belirlenen kriterler doğrultusunda şekillenecek sacın kesim hattına form verilmiş ve yırtılan kıvrım bölgesinin yarıçapı 5 mm'den 10 mm'ye çıkartılmıştır (Şekil 19).



Şekil 17. Parçanın perspektif görünüşü

Buruşmaların çoğu parçanın kesim hattının dışında kalmaktadır. Parçanın kesim hattı içinde kalan bölgelerdeki buruşmalar ise parçanın çalışmasını engellemeyecek boyutta ve miktardadır. Çalışmanın sonunda aracın üzerine takılabilecek kalitede parça elde edilebilmiştir.



Şekil 18. İçteki ve dıştaki buruşmalar



Şekil 19. Parçanın değiştirilen kıvrım bölgesi

## 8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Araç süspansiyon sisteminin önemli bir parçası olan askı desteği ve kalıpları bu çalışmalar sonucunda hasarsız bir şekilde imal edilebilmiştir. İlk modelden itibaren kalıp sistemine eklenen her sınır şartı ve özelliğin, şekillendirme işlemine etkisi rahatlıkla gözlemlenmiş ve üç boyutlu geometrik modelin nasıl değiştirilmesi gerektiği hakkında fikir vermiştir.

Yapılan araştırmalar sonucunda derin çekme işlemine; çekme derinliği, şekillendirilmemiş sacın kesim hattı, şekillenecek sacın malzemesi, iş parçasının sac kalınlığı, kalıp yüzeylerinin geometrik formu, iş parçasının kalıp yüzeylerine göre açısı, pot çemberinin baskı kuvveti, kalıp yüzeylerinin ve iş parçasının sürtünmesi (yağlama, naylon serme vb.) etki ettiği belirlenmiştir. Bu etkiler Tablo 1'de gösterilmiştir.

İstenen parçanın kalıptan kusursuz çıkması; bilgisayar destekli çözümler olmadan, deneme yanılma yolu ile yapıldığında, maliyeti oldukça yükselir ve uzun zaman alır.

Prototip çalışması yapılmadan dökümü yapılan metal kalıplar ise bir tasarım problemi çıktığında kaynak ile malzeme ilavesi ve tekrar işleme sureti ile düzeltilmeye çalışılmaktadır. Bu işlem hem kalıp ömrünü kısaltmakta hem de imalat süresini uzatmaktadır.

Yapılan çalışmalar sonunda soğuk şekillendirme işlemi için sonlu elemanlar yöntemi ile ekspilisit analizin tutarlı sonuçlar verdiği ve tasarımı yönlendirmek için kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çekme, derin çekme ve form kalıpları gibi malzemenin yüksek plastik deformasyona uğradığı veya kompleks yüzey geometrileri içeren parçalarda, şekillendirme sonucu parçanın ne şekil alacağı sonlu elemanlar yöntemi ve ekspilisit analiz ile önceden

belirlenebilir, kalıp tasarımı, imalat basamakları ve gerekirse parça tasarımı tekrardan gözden geçirilebilir.

Tablo 1. Derin Çekmeye Etki Eden Faktörler

Faktör	Değişiklik	Etki	
		Buruşma	Yırtılma
Çekme derinliği	Azaltıldı	↓	↓
Kesim hattı	Daraltıldı	↓	↓
Malzeme	Elastisite modülü düşürüldü	↓	↓
Sac kalınlığı	Arttırıldı	↑	↓
Kalıp yüzeyleri	Eğrilik yarıçapı büyütüldü	↓	↓
Kalıp açısı	Arttırıldı	↓	↓
Baskı kuvveti	Azaltıldı	↑	↓
Yüzey sürtünmesi	Azaltıldı	↔	↓

↓: azaldı, ↑: arttı, ↔: değişmedi

## 9. KAYNAKLAR

Anonymous, 2001. ANSYS.Theory of ANSYS (Help files), ANSYS.

Boogaard, A.H. V., Meinders, T., Huetink, J. 2003. Efficient Implicit Finite Element Analysis of Sheet Forming Processes, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 56: 1083-1107.

Cho, J. W., Yang, D. Y., Chung, W. J., 2002. A simplified Approach for Incorporating Thickness Stress in the Analysis of Sheet Metal Forming Using Shell Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 53: 2311-2327.

Hill, R. 1950. The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, New York.

Hughes, T. J. R. 1987. The Finite Element Method, Prentice-Hall, New Jersey.

Kawka, M., Kakita, T., Makinouchi, A. 1998. Simulation of Multi-step Sheet Metal Forming Processes by a Static Explicit FEM Code, Journal of Materials Processing Technology, 80-81: 54-59.

Kırılı, O. 2003. Derin Çekme ile Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Non-linear Analizi, Yüksek Lisans Tezi,

Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Kutt, L. M., Nardiello, J. A., Ogilvie, P. L., Pifko, A. B., Papazian, J. M. 1999. Non-linear Finite Element Analysis of Springback, Communications in Numerical Methods in Engineering, 15: 33-42.

Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Baldoukas, A. K. 1997a. Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit Finite Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics Part 1. Deep-drawing of Cylindrical Cups, Journal of Materials Processing Technology. 72, 48-60.

Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Baldoukas, A. K. 1997b. Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit Finite Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics Part 2. Deep-drawing of Square Cups, Journal of Materials Processing Technology. 72, 110-116.

Rojek, J., Onate, E., Postek, E. 1998. Application of Explicit FE Codes to Simulation of Sheet and Bulk Metal Forming Processes, Journal of Materials Processing Technology. 80-81, 620-627.

Takuda, H., Mori, K., Fujimoto, H., Hatta, N. 1997. Fracture Prediction in Stretch Forming Using Finite Element Simulation Combined With Ductile Fracture Criterion, Archive of Applied Mechanics, 67: 143-150.