

126892

**SAC ŞEKİLENDİRME KALIBI ÇEKME
YÜZEYLERİNİN TASARIMINDA SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİNİN KULLANILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Uçak Müh. Mehmet Murat ERGELDİ
(503931129)

**İ.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DENEYİMANTASYON MERKEZİ**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Ocak 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Ocak 2002

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Haydar LİVATYALI

Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Levent GÜVENÇ

Yrd.Doç.Dr. Şafak YILMAZ

OCAK 2002

126892

ÖNSÖZ

Otomotiv sektöründe çalışan biri olarak, bir otomobili oluşturan sac parçaların imalatında önemli problemlerden biri olan geri yaylanma olayını incelediğim ve çözümler bulmaya çalıştığım bu çalışma bana mesleki anlamda pek çok şey katmış, bilinç düzeyimi artırmıştır.

Kendisine bu fikirlerle gittiğim ilk andan itibaren beni sürekli destekleyip, yönlendiren danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Haydar Livatyalı'ya, çalışma sürecinde beni değerli fikirleri ile besleyerek firmam Ford Otosan olanaklarını sunan, Sayın Takım Kalıp Alan Müdürü Emin OFLEZER'e, Takım Kalıp Alan Müdür Yardımcısı A. Murat USER'e, Ekip Lideri Gökhan DAİ'ye, bilgisayar programını yazan çalışma arkadaşım Fatih ÖNHON'a, bazı simülasyonlarda yardımcı olan çalışma arkadaşım Mustafa AKBULUT'a, diğer iş arkadaşlarıma ve en önemlisi tüm hayatım boyunca bana sürekli destek olan aileme teşekkür ederim.

Ocak 2002

M. Murat ERGELDİ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNİN SİMÜLASYONU	5
2.1 Sac Şekillendirme Simülasyonları	5
2.1.1 Sac Şekillendirme İşlem Basamakları	5
2.1.1.1 Sacın Kalıba Yüklenmesi (Gravity)	5
2.1.1.2 Tutma (Holding)	6
2.1.1.3 Çekme (Drawing)	6
2.1.1.4 Kesme (Trimming)	6
2.1.1.5 Geri Yaylanma (Springback)	7
2.1.2 Sac ve Kalıp Yüzeyi Modellemesi	7
2.1.2.1 Gerekli Denklemler	7
2.1.2.2 Sürtünme Kuvveti Modeli	8
2.1.2.3 Süzdürme Çubuğu Modeli	8
2.1.3 Mevcut Sac Şekillendirme Simülasyon Algoritmaları	8
2.1.3.1 Rijit Plastik ve Elastik Plastik	9
2.1.3.2 Statik Kapalı Yöntem	9
2.1.3.3 Statik Açık Yöntem	9
2.1.3.4 Dinamik Açık Yöntem	10
2.1.3.5 Akademik ve Ticari Yazılımlara Genel Bakış	10
2.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Sac İmalatındaki Uygulamaları	13
3. SAC ŞEKİLLENDİRME SİMÜLASYONLARI İÇİN ÖRNEK VAKALAR	15
3.1 Kullanılacak Parçalar	15
3.1.1 Deneme Parçası	15
3.1.2 Gerçek Paneller	16
3.2 Kapalı Yöntemle Simülasyon	19
3.2.1 AutoForm Yazılımının Tanıtımı	19
3.2.1.1 Geometri	19
3.2.1.2 Operasyon Tanımlanması	20
3.2.2 Arka Kapı Dış Panelinin Kapalı Yöntemle Simülasyonu	22
3.2.2.1 Sacın Kalıba Bırakılması	27
3.2.2.2 Tutma	28
3.2.2.3 Çekme	29
3.2.2.4 Geri Yaylanma	33
3.2.3 Ön Göğüs Panelinin Kapalı Yöntemle Simülasyonu	34

3.2.4 Arka Şasi Kolu Panelinin Kapalı Yöntemle Simülasyonu	36
3.3 Dinamik Açık Yöntemle Simülasyon	39
3.3.1 OPTRIS yazılımının Tanıtımı	40
3.3.1.1 Geometri	40
3.3.1.2 Operasyon Tanımlanması	41
3.3.2 Arka Kapı Dış Panelinin Dinamik Açık Yöntemle Simülasyonu	42
3.3.3 Ön Göğüs Panelinin Dinamik Açık Yöntemle Simülasyonu	43
3.3.4 Arka Şasi Kolu Panelinin Dinamik Açık Yöntemle Simülasyonu	44
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI	46
4.1 Arka Kapı Dış Panel	47
4.1.1 Kesitler	47
4.2 Ön Göğüs İç Paneli	50
4.2.1 Kesitler	51
4.3 Arka Şasi Kolu Paneli	54
4.3.1 Kesitler	54
5. GERİ YAYLANMA TELAFİSİNDE YÖNTEM	59
5.1 Geliştirilen Yöntemin Temelleri	59
5.1.2 Sprinter Programının Tanıtılması	72
5.1.3 ICEM Surf Yazılımının Tanıtılması	76
5.1.4 Örnek Uygulama	77
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	94
6.1. Özet	94
6.2. Sonuçlar ve Öneriler	95
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	102

KISALTMALAR

CAD	: Computer Aided Design
CAM	: Computer Aided Manufacturing
CNC	: Computer Aided Numerical Control
IGES	: Initial Graphic Exchange Specification
VDA	: Verband Der Automobilindustrie
STL	: Stereolihtography
FLD	: Forming Limit Diagram
FLC	: Forming Limit Curve
FLC	: Forming Limit Curve
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
BDİ	: Bilgisayar Destekli İmalat



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Mevcut ticari ve akademik yazılımlar [9]	11
Tablo 3.1: Arka kapı dış panelin özellikleri	26
Tablo 3.2: Ön göğüs panelinin özellikleri	34
Tablo 3.3: Arka şasi kolu panelinin özellikleri.....	37
Tablo 3.4: OPTRIS eleman oluşturma teknikleri	40
Tablo 6.1: Arka şasi kolu panelinde geri yaylanma telafisindeki gelişmeler: Verilen değerler şapka kesitinin olması gereken açıklığından sapma miktarlarıdır.	97



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Bir otomobilin ön göğüs takviye paneline ait çekme kalıbı	2
Şekil 2.1: Simülasyonların üretim sürecindeki rolleri [13]	13
Şekil 3.1: Ön simülasyonlar ve yazılımların öğrenilmesi sırasında kullanılacak deneme parçası	16
Şekil 3.2: Hafif ticari bir aracın arka kapı dış panel sacı	17
Şekil 3.3: Hafif ticari bir aracın ön göğüs paneli	18
Şekil 3.4: Bir hafif ticari araca ait arka şasi kolu paneli	18
Şekil 3.5: AutoForm Die Designer Modülünde yapılmış addenda ve binder yüzeyleri	20
Şekil 3.6: Hafif ticari bir aracın arka kapı dış panel sacı	23
Şekil 3.7: Arka kapı dış panelin çekme kalıbında addenda ve binder modellemesi ..	24
Şekil 3.8: Erkek kalıp ile pot çemberi arasındaki ayrım hattı	25
Şekil 3.9: Arka kapı dış panelin çekme kalıbı yüzeylerinin açık halde yandan görünüşü	25
Şekil 3.10: Tutma esnasında kalıp parçalarının konumu	26
Şekil 3.11: Sacın kalıba konması	27
Şekil 3.12: Tutma esnasında sacın görünümü	28
Şekil 3.13: Şekillendirme sınır diyagramı	30
Şekil 3.14: Çekme esnasında ilk 64 mm’de sacın form durumu.....	31
Şekil 3.15: Çekme operasyonun sonunda sacın form durumu	32
Şekil 3.16: Çekme operasyonun sonunda sacın geri yaylanma diyagramı	33
Şekil 3.17: Ön göğüs paneli	34
Şekil 3.18: Ön göğüs paneli tutma aşaması.....	35
Şekil 3.19: Ön göğüs paneli çekme sonu	36
Şekil 3.20: Arka şasi kolu paneli çekme kalıbı	37
Şekil 3.21: Arka şasi kolu paneli çekme simülasyonu simetri düzlemi	38
Şekil 3.22: Arka şasi kolu paneli çekme simülasyonu kalınlık diyagramı.....	38
Şekil 3.23: Arka kapı dış panelin OPTRIS’teki çekme simülasyonu form diyagramı	43
Şekil 3.24: Ön göğüs panelinin OPTRIS’teki çekme simülasyonu	44
Şekil 3.25: Arka şasi kolu panelinin OPTRIS’teki çekme simülasyonu form diagramı	45
Şekil 4.1: Çekilmiş sacın üzerinde kesitlerin dağılımı	46
Şekil 4.2: Kesit A6-B6	48
Şekil 4.3: Şekil 4.2’de gösterilen detay 1	48
Şekil 4.4: Şekil 4.2’de gösterilen detay 2	49
Şekil 4.5: A15-B15 kesiti	49
Şekil 4.6: Şekil 4.5’de gösterilen detay 3	50
Şekil 4.7: Ön göğüs paneli kesitleri	51
Şekil 4.8: A0-B0 kesiti	52
Şekil 4.9: A0-B0 kesiti	53
Şekil 4.10: A6-B6 kesiti	53
Şekil 4.11: Çekilmiş parçaya ait kesitler ve kesitlerdeki açıklıkların parantez içinde verilen kalıptaki ölçüyle karşılaştırmaları	55

Şekil 4.12: A0-B0 kesiti	56
Şekil 4.13: A3-B3 kesiti	57
Şekil 4.14: A8-B8 kesiti	58
Şekil 5.1: Sünek bir metaldeki geri yaylanmanın akma diyagramı üzerinde gösterilişi	60
Şekil 5.2: Çeşitli geri yaylanma şekilleri (a) Doğrusal açılma bölgesel bükmelerde görülürken (b) eğrisel açılma genellikle çekme ve bükmenin birlikte olduğu durumlarda görülür.....	60
Şekil 5.3: Bükülen bir sac kesiti üzerinde geri yaylanmanın gösterimi (a) L boyundaki bir sac kesitinin M momenti T çekme kuvveti etkisinde bükülmesi, (b) aynı kesitin yükleme kalktıktan sonraki hali	61
Şekil 5.4: Bükme ve çekme etkisindeki bir sac kesitindeki gerilme dağılımının bileşenleri	62
Şekil 5.5: Bükme ve çekme etkisindeki bir sac kesitindeki plastik uzama bölgesinin dış yüzeyden iç yüzeye doğru (1- η)t derinliğinde dağılımı	62
Şekil 5.6: Geri yaylanmanın A kesitinde çekilmiş bir sac üzerinde B kesiti formunda oluşması sırasında eğrilik yarı çapındaki değişimin geri yaylanma telafisi içeren C kesitinde bir geometri elde edilmesinde kullanılması.....	64
Şekil 5.7: Çekme geri yaylanma ve telafi geometrilerinde aynı düğüm noktasının konumları	65
Şekil 5.8: A kesitine sahip bir geometrinin B kesitine geri yaylanmasının ardından C kesiti şeklinde geri yaylanma telafisi içeren geometrinin gösterimi	67
Şekil 5.9: AutoForm dosyasının içeriği: Üst bölümde düğüm noktalarının koordinatları ve alt bölümde bu noktaların birbirleriyle eleman oluşturmak üzere düzenlenmesi	68
Şekil 5.10: Vektör	69
Şekil 5.11: Vektör çarpımı	70
Şekil 5.12: Sprinter programı ana ekranı	73
Şekil 5.13: Nastran dosya yapısı	74
Şekil 5.14: ICEM Surf yazılımının ana ekranı	77
Şekil 5.15: Arka şasi kolu geri yaylanma miktarları ve kesitler	78
Şekil 5.16: Sprinter'ın panel geometrisinin, kalıp geometrisinin ve AutoForm'un hesapladığı geri yaylanmış panel geometrisin A3-B3 kesitinde karşılaştırması	79
Şekil 5.17: Sprinter'ın hesapladığı geometrinin, kalıp geometrisinin ve OPTRIS'in hesapladığı geri yaylanmış geometrinin A3-B3 kesitinde karşılaştırması	80

SEMBOL LİSTESİ

F	: Kuvvet
μ	: Sürtünme katsayısı
p	: Pot çemberinin temas basıncı
V_r	: Sac ile metal arasındaki bağıl hız
t	: Sac kalınlığı
ρ	: Eğrilik yarıçapı
E	: Young Modülü
T	: Çekme Kuvveti
M	: Moment
ν	: Poisson Oranı



SAC ŞEKİLLENDİRME KALIBI ÇEKME YÜZEYLERİNİN TASARIMINDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

ÖZET

Bu yüksek lisans tez çalışmasında ilk olarak bu endüstri dalında çok önemli bir yeri olan sac panellerin kalıplarla imalatı araştırılmıştır. Bu imalat tekniğinde karşılaşılan “geri yaylanma” problemi ele alınmış ve bu problemin çözüm yolları değerlendirilmiştir.

Birinci bölümdeki kısa girişin ardından, bu konuda yayınlanmış olan makaleler de dahil olmak üzere mevcut literatür taranmış, sonlu elemanlar yönteminin bu alandaki uygulamalarına değinilmiş, bu yöntemi esas alan bazı ticari yazılımlardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, örnek çalışmalar için seçilmiş olan 3 adet gerçek ve bir adet hayali tasarlanmış sac panel, geometri, malzeme ve işlem parametrelerini içerecek şekilde tanıtılmıştır. Ek olarak, seçilen parçaların AutoForm™ ve OPTRIS™ yardımıyla simülasyonu için gerekli olan simülasyon adımlarının tanımlanması detaylı olarak verilmiştir. Kalınlık dağılımı, şekillendirme hataları ve genel şekillenme grafikleri sunulmuş ve tartışılmıştır.

Dördüncü bölüm, çekme ve geri yaylanma simülasyonları sonuçlarının, gerçek panel geometrisiyle kritik kesitlerde karşılaştırılmasını içermektedir..

Beşinci bölümde, sonlu elemanlar programlarıyla hesaplanmış olan geri yaylanmayı telafi etmek ve orijinal kalıp yüzeylerini değiştirmek için geliştirilmiş olan bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemin matematik ifadesi verildikten sonra, çekmeden çıkmış ve geri yaylanmış panel geometrisini kullanarak yöntemi kolay uygulanabilir hale getirmek üzere geliştirilmiş bilgisayar programı ve ticari bir yüzey geliştirme programı olan ICEM Surf™ tarif edilmiştir. Önerilen yöntem örnek vakalardan hafif ticari bir vasıtaya ait arka şasi kolu panelinde uygulanmış, ve tekrar simülasyon yapılmasından sonra panel geometrisindeki gelişmeler ortaya konarak irdelenmiştir.

Son bölümde ise çalışmanın genel yorumlanmasına yer verilerek, başlıca önemli sonuçlar özetlenmiştir. Son olarak önerilen kalıp yüzeyi tasarım yöntemi başarılı ve zayıf yönleriyle tartışılarak, gelecekteki çalışmalar için bazı öneriler sıralanmıştır.

DESIGN OF SHEET METAL FORMING DRAW DIE SURFACES USING FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

In this thesis, sheet metal forming using hard dies, which has a significant role in the automotive industry, was investigated. More specifically, the springback problem in stamping die design was elaborated and some solution methods in die design were evaluated.

After a brief introduction in Chapter-1, in the second chapter a literature summary, including some recently published papers on application of the finite element method in the simulation of sheet metal stamping and some commercial FEM programs, was provided.

In Chapter-3, three industrial and one hypothetical sheet metal part selected for case studies were introduced including geometry, material and process parameters. Additionally, the steps of modeling and simulation of the selected parts using AutoForm™ and OPTRIS™ programs were described in detail. Some of the simulation results, including thickness distribution, forming defects and formability charts were provided and discussed.

In the fourth chapter, the simulation results including as-drawn and after-springback panel geometry with the measurements performed on actual panels in the press-shop were compared on some selected critical sections.

Chapter-5 includes introduction of the method developed to compensate springback calculated by the finite element programs and design the over-crown necessary to modify the original die geometry. After description of the mathematical method of die surface modification, implementation of the method using the developed computer program that uses panel data after drawing and springback and the commercial surfacing program ICEM Surf™ was described. This method was applied on one of the simulated cases, member floor side rear of a light commercial vehicle, and the improvement in panel geometry after simulating with the modified die geometry was shown and discussed.

In the last chapter, the whole was summarized and the significant conclusions were listed. Finally, the strengths and weaknesses of the proposed die design method were discussed followed by a number of suggestions for future work.

BÖLÜM 1

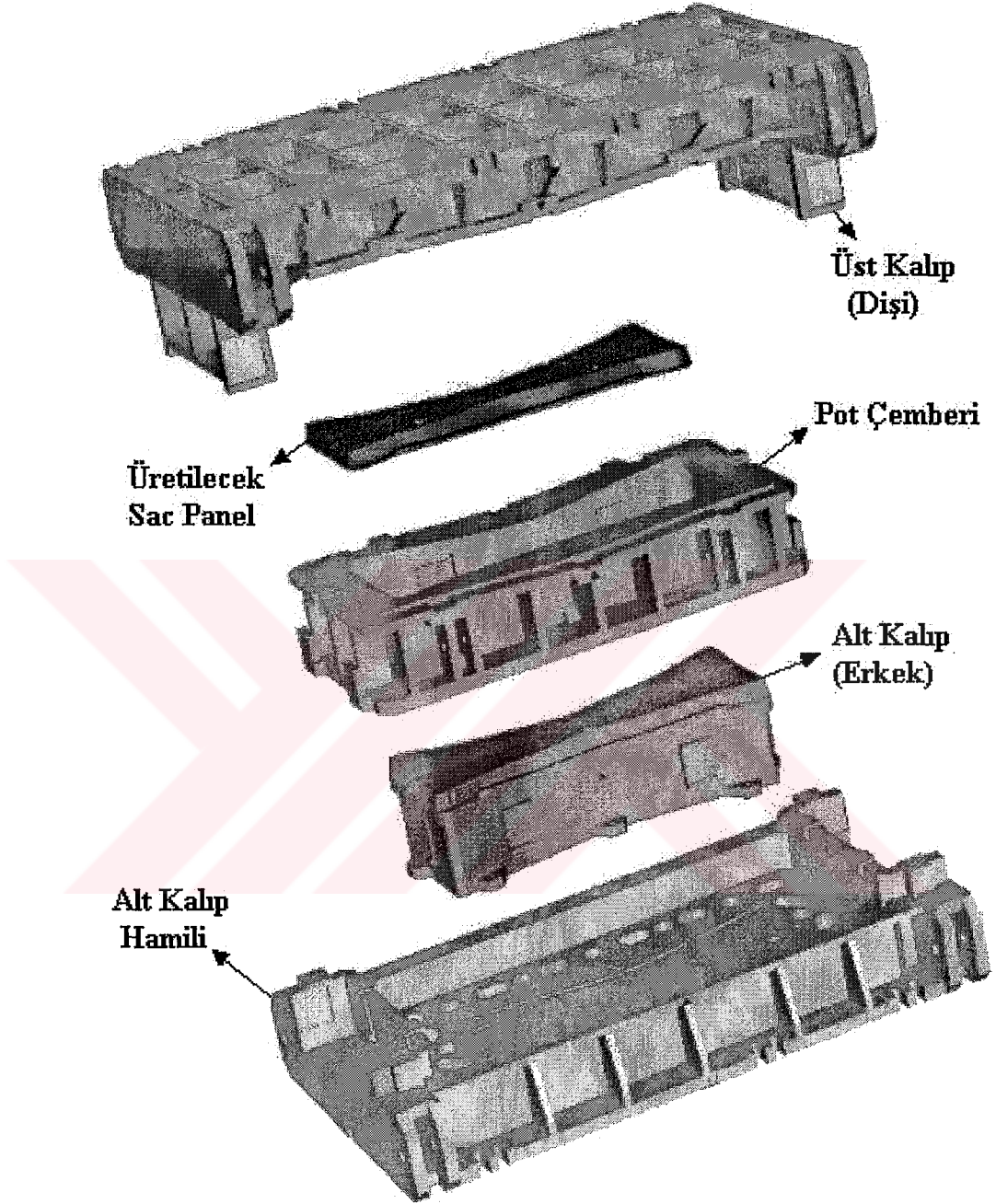
GİRİŞ

Geride bıraktığımız 20. yüzyıl içinde, sanayi devrimiyle birlikte metal malzemeler pek çok ürünün yapısında kullanılmaya başlamıştır. Bu durum özellikle metal malzemelerin ince sac ve şerit formunda üretilebilmesiyle daha da yaygınlaşmıştır. Sac şekillendirme, günümüzde hemen bütün endüstri dallarında, ürün imalatının bir bölümünü teşkil etmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe ise, sac şekillendirme en önemli imalat aşamasını temsil eder.

Sac şekillendirmede pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak, bir kağıt yaprak özelliklerine benzer yapıdaki sac malzemenin, istenen forma sahip daha rijit nesneler (kalıp elemanları) yardımıyla şekillendirilmesini esas alırlar. Bu nesne bazen sertleştirilmiş bir çelik parça, bazen basınçlı su, ve bazen de özel amaçlı kompozit malzemelerdir. Bunlardan en yaygını, birbirini tamamlayan, genelde “erkek kalıp” ve “dişi kalıp” olarak adlandırılan formlu dökme demir veya çelik malzemeden parçalar arasına sacın konulup, orta kısımda bir çekme kuvveti ve kenarlarda yüksek bir basma (germe) kuvveti uygulanmasıyla yapılan şekillendirmedir. Bu çalışma sadece bu yöntemin üzerine odaklanmıştır. Elbette elde edilen her sonuç, diğer şekillendirme biçimleri açısından da yararlı olabilir.

Kalıp, yukarıda kısaca değinildiği gibi, imal edilmesi gereken üç boyutlu forma sahip sacın, geometrik özelliklerine sahip ve birbiriyle uyumlu çalışan, genellikle kır demir veya çelik döküm parçalardan oluşan bir bütündür. Kalıp, sacda yapılması gereken işlemlere göre tasarlanır. Bu işlemler büyük çoğunlukla bir seferde tamamlanamaz ve işlemlerin sırasıyla gerçekleştirildiği birden fazla kalıp imal edilir. Örneğin, bir otomobil dış yüzeyindeki bir sac panelin imalatı için çekme, kesme, delme ve ütüleme diye adlandırılan işlemleri gerçekleştiren dört veya beş kalıp yapılır. Sac

sırayla bu kalıplarda işlenerek bitmiş panel elde edilir. Şekil 1.1’de bir otomobilin ön göğüs takviye paneli ve bu panele ait çekme kalıbı görülmektedir.



Şekil 1.1: Bir otomobilin ön göğüs takviye paneline ait çekme kalıbı

Çekme kalıbı, bir kalıp setinin genellikle ilk kalıbıdır. Bazen sacın dış hatlarını (açınım) belli bir formda kesen çevre kesme kalıpları çekme kalıbından önce olsalar da, çekme kalıbına, saca panel formunda ilk ve en büyük şekillendirmeyi gerçekleştiren kalıp demek yanlış olmaz. Bu noktada çekme kalıbının önemi, uygun

formda parça elde edilmesi açısından açıkça ortaya çıkar. Panelin bazı yüzeylerine daha sonra ütüleme veya form kalıplarında şekil vermek mümkün olsa da, bu miktar olarak sınırlı olacaktır. Zira şekil almış bir panelde büyük şekillendirmeler sacın mevcut formunda bozulma, çatlama, yırtılma veya kırışmalara yol açar. Kısaca iyi tasarlanmış bir çekme kalıbı, panelin başarılı bir şekilde imal edilmesinde çok önemli bir paya sahiptir.

Yukarıda belirtildiği gibi çekme kalıbı panelin istenen son formu alması için gerekli şekillendirmenin büyük oranda verildiği kalıptır. Tasarım bilgisine göre BDİ (bilgisayar destekli imalat) programları ve CNC tezgahlar ile işlenen çeliklerin panele istenen formu vermesi beklenir. Ancak sac malzeme yüksek çekme, germe ve bükme kuvvetleri altında almış olduğu formu bu kuvvetler üzerinden kalktığında koruyamaz ve bazı kısımlarında ağırlıklı olarak elastik kabul edilecek bir geometrik değişim gerçekleşir. Buna “geri yaylanma” denir. Bu olay panelin istenen formdan uzaklaşmasına, bir geometri hatasının oluşmasına yol açar. Bunun miktarı ve biçimi, başta malzeme özellikleri, tasarlanan parça geometrisi, kalıp yüzeylerindeki basınçlar, ve imalat yöntemi gibi parametrelere bağlıdır. Çoğu panelde bu hata tasarımda tanımlanan toleranslar içersinde kaldığından herhangi bir düzeltme yapılmadan panel araca takılmak üzere montaj hatlarına gönderilir. Öte yandan estetiğin çok önemli olduğu ve aracın kişiliğini belirleyen dış panellerde toleranslar oldukça dardır ve imal edilen panelin tasarım verilerine mümkün olduğunca yakın olması istenir. Zira araç son müşteriye ulaştığında, görünümde bir kusur yada eksiklik satışı engelleyebilir. Bu yüzden bu tür bir tolerans dışı geri yaylanma oluştuğunda çeşitli yöntemler denenerek hata giderilmeye çalışılır.

Geçmişte ve günümüzde, halen pek çok otomotiv firmasında geri yaylanmanın yol açtığı sorunları çözmek amacıyla, bazı panellerin daha önce imal edilmiş benzer panellerden edinilen tecrübelerle imalatı mümkün olabilmektedir. Bu tecrübenin mevcut olmadığı panellerde ise geri yaylanma oluşuktan sonra çözümler üretilmekte, yukarıdaki parametreler düşük maliyet sıralamasına göre incelenip değiştirilmektedir. Ancak çoğunlukla çözüm için kalıp yüzeylerinde geri yaylanmayı telafi edecek geometri değişiklikleri (over-crown) yapmak gerekmektedir. Bu durumda kalıp imalatçısını zahmetli, masraflı ve zaman alıcı bir iş beklemektedir.

Öte yandan bazı ticari yazılımlar ile son yıllarda kendine pek çok uygulama alanı bulan sonlu elemanlar yöntemini [1] esas alarak derin çekme simülasyonları gerçekleştirebilmek mümkün olmuştur. Bu sayede operasyonlar bilgisayar ortamında gözlemlenip değişiklikler yapılabilir. Yine son dönemde bu yazılımlar geri yaylanmayı da tahmin etme özelliği kazanmışlardır. Gerçi bu konuda doğruluk oranları çekme simülasyonlarından daha düşüktür. Ancak biraz tecrübeyle desteklendiğinde gerçekten yararlı araçlar haline gelebilmektedirler [11-12].

Tüm bu bilgiler ışığında eğer geri yaylanma matematiksel olarak doğru hesaplanır ve telafi edecek şekilde kalıp geometrisine yansıtılırsa, hem emek hem de zaman açısından önemli bir tasarruf sağlanacağı açıktır. İşte bu proje, çekme işlemi parametreleri sorgulanarak sonlu elemanlar yöntemiyle geri yaylanmanın hesaplanmasının ardından, bu bilgiyi kullanarak kalıp çekme yüzeyi geometrisinde metodik düzeltme yapılmasını, bu yapılırken sonlu elemanlar yöntemlerinden kapalı ve açık [8-9] yöntemlerin karşılaştırılmasını, literatür taraması ile mevcut teknoloji düzeyinin belirlenmesini hedeflemektedir.

BÖLÜM 2

SAC ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNİN SİMÜLASYONU

2.1 Sac Şekillendirme Simülasyonları

2.1.1 Sac Şekillendirme İşlem Basamakları

Otomobil endüstrisindeki sac şekillendirme simülasyonları, beş ana işlem adımını simüle ederler. Tutma, çekme, kesme, flanş bükme ve geri yaylanma [5-6]. Bunlara bir ön adım olarak sacın kalıp üzerine ilk yerleştirilmesi de ilave edebiliriz. Geri yaylanma ise son dönemlerde önemi artan bir simülasyondur. Çünkü otomotiv endüstrisinde daha az enerji harcamak için daha hafif araçlar üretilmeye çalışılırken yüksek mukavemetli çelikler ya da alüminyum alaşımlar kullanılmaktadır. Bu malzemeler diğer standart malzemelerle kıyaslandığında, ya akma mukavemetleri yüksektir veya Young modülleri düşüktür. Her iki durumda da aşırı miktarda geri yaylanma oluşur. Geri yaylanmanın miktarı artıkça tasarlanan panele ulaşmak ve geri yaylanmayı kontrol etmek daha zor bir hale gelir.

2.1.1.1 Sacın Kalıba Yüklenmesi (Gravity)

Bu aşama, sacın sadece yerçekimi kuvveti etkisi altında serbestçe pot çemberi yüzeyine yerleştirilmesidir. Bu yüzeyin düzlemsel olduğu durumlarda bu aşama geçilebilir çünkü sac düz bir halde kalır. Ancak pek çok kalıpta pot çemberi yüzeyi eğimlidir ve bu yüzden sacın kalıba yüklenmesinin simüle edilmesi gerekir. Doğal olarak, pot çemberi yüzeyi sacın tutma aşamasında fazla bir ön gerilmeye neden olmayacak biçimde geliştirilir.

2.1.1.2 Tutma (Holding)

Sacın yüklenmesi geçildikten sonra pot çemberi yüzeyleri sacı tutmak üzere kapanırlar. Genelde bu tutma sacın kenarlarında olmakla birlikte bazen buna ilaveten sacın orta bölgelerinde de ada şeklinde tutma yapılması gerekebilir. Bu aşamada henüz erkek kalıp saca temas etmemiştir. Pot çemberi yüzeyleri eğer yeterince geliştirilememiş ve sacın serbest haldeki duruşuna uygun bir formda oluşturulamamışsa tutma sırasında sac üzerinde çekme öncesi bazı deformasyonlar ve gerilmeler oluşacaktır. Her durumda simülasyon yüzeyler birbirine mümkün olduğunca yakın durumdayken başlatılmalıdır. Pot çemberi basıncı mikro saniyeler içinde yavaşça artırılmalıdır. Böylece pot çemberi yüzeyleri sacı yakaladığında dinamik etkilerin oluşmaması sağlanır.

2.1.1.3 Çekme (Drawing)

Çekme aşaması simülasyonun en önemli kısmıdır ve eğer güvenilir sonuçlar isteniyorsa dikkatlice analiz edilmelidir. Sonlu eleman yapısının, en küçük şekillendirmeyi ifade edebilmek için optimum olan en iyi yapıda olması gerekir. Bu ağ eleman yapısı, bir önceki aşamada oluşturulmuş olan daha düşük hassasiyetli ağ yapıdan eleman iyileştirmesi yaparak elde edilebilir. Bu özellik pek çok yazılımda mevcuttur. Dinamik açık yöntemle çalışan yazılımlarda hesaplama zamanını düşürmek için proses emniyetli bir biçimde hızlandırılabilir. Bazı yazılımlar kalınlığı olmayan kabuk eleman kullanırlar. Bu durum, sac kalınlığı artıkça gerçekçi sonuçlar elde edilmesini zorlaştırır. O nedenle proses aşamasının özelliklerine göre eleman seçilebilmesi gerekir.

2.1.1.4 Kesme (Trimming)

Bu aşamada eleman ağ yapısı daha önceden belirlenmiş olan bir hat doğrultusunda kesilir ve elemanlar bu hat sınır olacak şekilde düzenlenirler. Henüz pek çok programda bu kesme işlemi sırasında oluşan deformasyonlar analiz edilmemektedir. Çünkü bu kesme açısı ve kesme çeliği ağzı profili gibi bazı parametrelerin

hesaplamalara katılmasını gerektirir ve hesaplamaları daha da karmaşık bir hale getirir.

2.1.1.5 Geri Yaylanma (Springback)

Yukarıdaki anlatılan çekme ve kesme aşamalarından sonra sac üzerindeki gerilmelerin ortadan kalkmasıyla panelde geri yaylanma oluşur. Bu durum panelin istenen formda üretilmesine engel olan önemli parametrelerden biridir. Geri yaylanmanın tahmin edilmesi pek çok açıdan faydalı olacaktır. Ancak bu aşama şu anda mevcut yazılımların genelde en zayıf oldukları bölümdür. Yine de her geçen gün, daha gerçekçi sonuçlar elde etmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir.

2.1.2 Sac ve Kalıp Yüzeyi Modellemesi

Tutma veya çekme simülasyonunda, kalıp yüzeyinin köşe yarıçapları genellikle çok küçük değildir ve r/t (t = sac kalınlığı) oranı 3'ten büyüktür. Bu yüzden sac, kalınlığı içermeyecek bir kabuk olarak modellenebilir. Ancak küçük yarıçapların bulunduğu flanş bükme simülasyonlarında ve kalın saclı simülasyonlarda hatalı hesaplama oluşmasını önlemek için 3 boyutlu modelleme gerekir. Bu yapılırken hesaplama zamanını azaltmak için 3 boyutlu modelleme hassas bölge için uygulanıp diğer bölümler yine kabuk elemanlarla modellenebilir.

Kalıplar ise saca teması basitleştiren rijit yüzeyler olarak modellenir. Bazı bölgelerde temas basıncı çok yüksek olabilir. Bu durumda kalıbı o bölge için deforme olabilir tanımlamak daha uygundur.

2.1.2.1 Gerekli Denklemler

Düşük uzama miktarlarında oluşan kırışmaların ve basılmış parçadaki geri yaylanmanın tahmin edilmesi hedeflendiğinden, malzemedeki deformasyonun elastik kısmı da modellenmelidir. Genelleştirilmiş Hooke kanunundaki Jaumann gerilme katsayısı kullanılır. Plastik uzamalar çok büyük olduğunda, gerekli formülasyon küçük uzamalardaki plastik teoriden ekstrapole edilerek sağlanır. Hill ortotropik akma kriteri ve akma kanunu formülasyona katılır. Geri yaylanma sırasında hatta çekme esnasında oluşabilecek ters plastik akışı ifade edebilmek için genelde

kullanılan isotropik sertleşme kanunu yerine anisotropik pekleşme kanunu kullanılmalıdır[9].Ayrıca sacın form limit diyagramı, şekillendirme sırasında yırtılmayı belirlemek için gereklidir. Tecrübelerle alüminyum gibi bazı metallerin orantısız uzamalar nedeniyle form limitlerinin çok altında yırtıldığı görülmüştür.

2.1.2.2 Sürtünme Kuvveti Modeli

Pek çok simülasyon yazılımında Coulomb sürtünme kanunu kullanılır [11];

$$F = - \mu p V_r / |V_r| \quad (2.1)$$

Bu denklemde μ sürtünme katsayısını, p temas basıncını, ve V_r sac ile kalıp yüzeyi arasındaki bağıl hızdır. Sürtünme katsayısı, temas basıncından, bağıl hızdan veya sacdaki uzamadan bağımsız kabul edilir. Ancak tecrübeler μ sürtünme katsayısının bu değişkenlere bağlı olduğunu göstermiştir [11]. Bu bağıllığın 3 boyutlu yüzey şekillendirme proseslerinde ifade edilmesi formülleri çok karmaşık hale getirmektedir. O nedenle bu durum henüz tam anlamıyla simülasyonlara yansıtılmış değildir.

2.1.2.3 Süzdürme Çubuğu Modeli

Süzdürme çubuğu, hesaplamaların çok karmaşık hale gelmemesi için genellikle elastik-plastik bir yay olarak modellenir. Bu sayede tutma esnasında süzdürme çubuğu hattı içinde kalan malzeme için gerçekçi bir simülasyon sağlanır. Bununla birlikte süzdürme çubuğunu geçerek form alan malzemenin yapısındaki değişiklik belirlenememektedir. Çok daha gerçekçi bir simülasyon için 3 boyutlu katı modeller kullanılmalıdır. Ancak bu yine hesaplamaları daha karmaşık hale getireceğinden pek uygulanmaz.

2.1.3 Mevcut Sac Şekillendirme Simülasyon Algoritmaları

Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sac şekillendirmesini simüle etmek amacıyla bir kaç farklı yöntem mevcuttur. Bunlar formülasyonlarındaki farklılıklara veya zaman parametresini ele alışlarına göre sınıflandırılabilir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre

avantaj ve dezavantajları bulunduğundan farklı yazılımlar birini veya bir kaçını esas alan çözümler sunmaktadırlar. Şimdi bu yöntemlere kısaca değinilecektir.

2.1.3.1 Rijit Plastik ve Elastik Plastik

Malzemenin rijit-plastik olduğu kabulünü yapmak sonlu elemanlar hesaplamalarını basitleştirerek daha hızlı bir hesaplamayı mümkün kılar [10]. Bu kabul, malzemenin elastikliğinin ihmal edilmesiyle sağlanır. Ancak hesaplama zamanında azalma ve formülasyonda sadelik için malzemedeki elastikliğin ihmal edilmesi bir takım kısıtlamalar getirir. Yerçekimi etkisindeki sacın pot çemberi veya dişi kalıp üzerine yayılırken yaptığı hareketler ve şekil vermenin hemen ardından oluşan geri yaylanma hesaplanamaması başlıcalarındandır. Elastik-plastik bir malzeme modellemesi bu iki hesaplamayı yapabilir, ancak çok daha karmaşık formülasyon kullandığından hesaplama zamanı dikkate değer miktarlarda artar.

2.1.3.2 Statik Kapalı Yöntem

Statik kapalı yöntem, sonlu elemanlar formülasyonunu, quasi-statik denklemler kurarak oluşturur [9]. Sac şekillendirmenin darbe etkisi içeren ve sacın dinamik hareketinden önemli ölçüde etkilenen bir proses olmaması nedeni ile, bu kabul mantıklıdır. Bu yöntemle yapılan hesaplama, karşıt dinamik etkilerin hesaplanmasını içermez. Bununla beraber, bu yöntemde rijitlik matrisi genelde diyagonal değildir ve bu durum, iteratif olarak çözümleme yapmayı gerektirir. Ancak bu çözümlemede, sac ile takım arasında sürekli yenilenen temas koşullarından dolayı bazen iterasyonlarının bir kesişime ulaşması, yani çözüm mümkün olmaz. Özellikle sac şekillendikçe aldığı karmaşık formların ifadesi temas koşullarını oldukça karışık hale getirdiğinden simülasyon tamamlanamaz.

2.1.3.3 Statik Açık Yöntem

Bu yaklaşım, kapalı yöntemin karşılaştığı çözüm iterasyonlarının sonuçlanamaması sorununu ortadan kaldırmak için, iterasyon gerektirmeksizin çözülebilecek bir teğet rijitlik matrisi oluşmasına neden olan, çok küçük bir zaman adımı tanımlar [9]. Bu küçük zaman adımından dolayı, bir çekme operasyonunun sonuçlanması için bir

hayli yüksek sayıda artırımsal adım oluşmaktadır. Çözüm hesaplamaları daha az hata içermekle birlikte, diğer yöntemlere göre hesaplama zamanı çok daha artmaktadır.

2.1.3.4 Dinamik Açık Yöntem

Dinamik açık yöntem, dinamik eşitlik denklemini her düğüm noktası için ve bütün zaman adımlarında çözümlemektedir [9]. Bu formülasyonun en temel avantajı, rijitlik matrisi oluşturulmasına ihtiyaç olmaması ve her adımda doğrudan çözümün mümkün olmasıdır. Bu yüzden tek bir zaman adımı için çözüm kapalı yöntemle göre çok daha hızlıdır. Ancak bunun yanında, zaman artımında dinamik kararlı bir çözüm elde etmek için, zaman adımının, girişim dalgasının hiç bir elemanı geçmemesi için kritik bir değerle sınırlandırılması gerekir. Bu genelde zaman adımının $10E-6$ saniye gibi bir değere eşitlenmesi demektir. Hesaplama zamanının azaltılması için, simülasyonlar genelde artırılmış takım hızlarında gerçekleştirilir ki bu da gerçekçi olmayan şekillendirme modellerine yol açar.

2.1.3.5 Akademik ve Ticari Yazılımlara Genel Bakış

Tek bir sınıflandırma yapılsa dahi yukarıda bahsedilen yöntemlerin birbirlerine göre önemli farklılıkları mevcuttur. Bazı ticari yazılımlar kullanıcı dostudur ve kararlılığı yüksektir. Bazıları ise hala gelişme sürecinde olup sadece uzmanlar tarafından kullanıldığında simülasyon yapabilirler. Yine pek çok yazılım üç boyutlu şekillendirme analizi yapabildiği halde bir kısmı, düzlem uzama veya asimetrik kabulleri esas aldığından, sadece iki boyutlu takım kesitlerini kullanarak genel şekil değiştirmeyi tahmin etmeyi amaçlar.

Sacın şekillendirilmesini tek adımda (one step) hesaplamaya yönelik hızlı fakat güvenilirliği daha düşük, basit yazılımlar da mevcuttur. Bazı algoritmalar şekillenmiş parçadan düz saca gitmek suretiyle hesaplama yapar. Ancak bu durumda şekillendirme simülasyonu açısından önemli olan sürtünme, kırıma gibi etkileri hesaplamak mümkün olmaz. Yine de bu tür uygulamalar başta da söylendiği gibi hızlıdır ve özellikle ilk sacın boyutlarını tespit için gayet yararlıdır.

Sac şekillendirilmesini gerçeğe mümkün olduğunca yakın tahmin edebilmek ve bunu mümkün olabildiğince çok parametreyle ifade edebilmek, şu an sonlu elemanlarla analiz yapan yazılım firmalarının benimsedikleri bir eğilimdir. Elbette hesaplama zamanı da önemli bir kriterdir. Bu yazılımları Tablo 2.1’de bazı özellikleriyle genel olarak görmek mümkündür. Bunlardan belli başlıcalarına kısaca değinmek yararlı olacaktır [9].

Tablo 2.1: Mevcut ticari ve akademik yazılımlar [9]

Program Name	Organizasyon	Ülke	Sınıflandırma
SHEET-3	Ohio State Univ.	ABD	Rijid- Visko-Plastik
MFP2D	Univ. Of Catalunya	İspanya	
MFP3D	Univ. Of Catalunya	İspanya	
FORMSYS-SHEET	KAIST	Kore	
CASHE	KAIST	Kore	
MILFRM	Ford Motor	ABD	Elasto-plastik Statik-Kapalı Y.
Dieka	Univ. Of Twente	Hollanda	
LAGAMINE	Univ. Of Liege	Belçika	
CALEMBOUR	Ecole Central Paris	Fransa	
ABAQUS	H.K.S Inc.	ABD	
FLECHE	Univ. Tech. Compiègne	Fransa	
NIKE 3D	Livermore Software	ABD	
AUTOFORM	ETH Zwrich	İsviçre	
BENDI	Ford Motor	ABD	
INDEED	INPRO	Almanya	
PROFIL	Inst.National Sci.	Fransa	
MARC	Marc Analysis	ABD	
ROBUST	Osaka Univ.	Japonya	
ITAS-3D	RIKEN Inst.	Japonya	
ITAS-2D	RIKEN Inst.	Japonya	
LS-DYNA3D	Livermore Software	ABD	Elasto-plastik Dinamik-Açık Y.
PAM-STAMP	E.S.I.	Fransa	
RADIOSS	MECALOG	Fransa	
ABAQUS/Explicit	H.K.S. Inc.	ABD	
OPTRIS	E.S.I.	Fransa	
CES-3D	Univ. Of Catalunya	İspanya	

Pam-stamp 1987 yılında geliştirilmeye başlanmıştır. Bu tarihten sonra pek çok otomotiv üreticinin kullanımına girmiştir. Bunlar arasında BMW, Fiat, General Motors, Hyundai, Renault sayılabilir. Pek çok CAD sistemi ile uyumlu olup IGES veya VDA formatında dosya transferi yapılabilir. Hem kabuk eleman hem de 3 boyutlu cidar eleman kullanmak mümkündür. Ters aç kontrolü, otomatik kalıp pozisyonlaması, otomatik eleman boyut ve sayı ayarlaması, geri yaylanma modülü, ve malzeme kütüphanesi mevcuttur.

Son yıllarda ESI grubuna katılmış olan bir yazılım olan OPTRIS [6] de dinamik açık bir yazılımdır. Yukarıdakilere ilaveten OPTRIS'te hidroform ve tüp şekillendirme simülasyonlarını da yapmak mümkündür. Bu yazılım ilerdeki bölümlerde daha ayrıntılı olarak incelenecektir.

ABAQUS biraz daha geniş amaçlı bir yazılımdır. Sadece sac şekillendirmede gerilme analizi değil aynı zamanda ısı transferi analizleri ve yapısal, sivil, tıbbi alanlardaki diğer mühendislik analizlerinde kullanılabilir. Bu nedenle pek çok eleman tip mevcuttur. Genelde araştırma projelerinde kullanılır ve ordu gibi büyük devlet kurumlarında yaygındır.

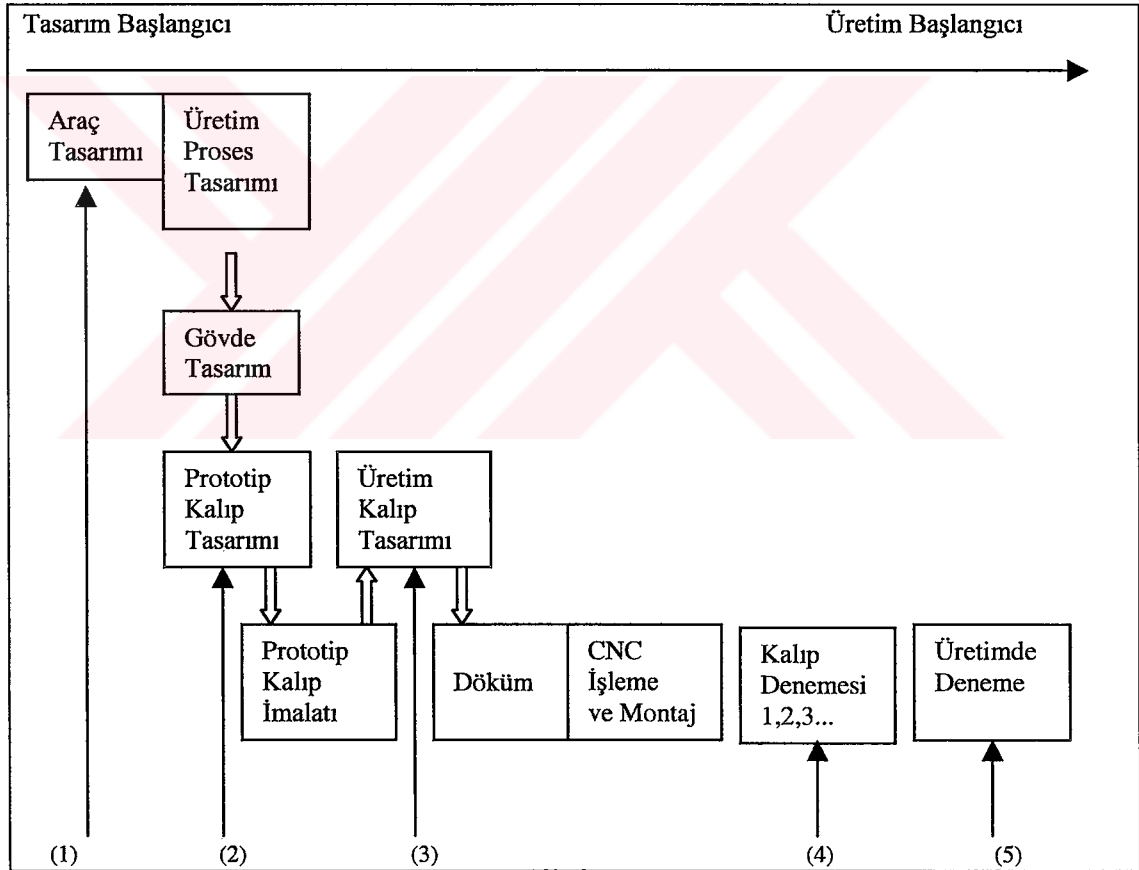
LS-DYNA geniş eleman kütüphanesi, gerek ısı transferi gerekse gerilme analizi yapabilmesi gibi özellikleri ile pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır. Genel olarak araştırma amaçlı ve çokça da üniversitelerde tercih edilir. Son zamanlar düşme testi modülü de bir yenilik olarak ilave edilmiştir. Sonlu elemanlarla analiz yapan yazılımları en eskilerinden biridir.

AutoForm [5] İsviçre kökenli bir yazılım olup diğer yazılımlara göre daha gençtir. Statik imlisisit yöntemle çalışır. One step ve incremental hesaplamalar yapılabilir. Kabuk eleman kullandığı için sac kalınlığı artıkça gerçekçi simülasyondan uzaklaşılır. Die-design modülü ile yardımcı çekme yüzeyleri bu program içersinden bir CAD programına ihtiyaç duymadan oluşturulabilir. Hatta daha sonra bu yüzeyler IGES çıktı olarak alınabilir. Bu yazılıma daha sonra detaylı olarak değinilecektir.

2.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Sac İmalatındaki Uygulamaları

Otomotiv endüstrisinde sac panellerin çamur modelden, montajı tamamlanmış araca kadar olan sürecinde pek çok mühendislik çalışması yapılmaktadır. Bu çalışmada sac panelin imalatı esas alındığından süreci bu açıdan incelemek uygun olacaktır.

Şekil 2.1’de sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla yapılan simülasyonların, sac imalat proseslerinin belirlenmesinde ne şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [13]. İlk aşamada simülasyonlar sac panelin mevcut geometrisiyle şekillendirilmesinin mümkün olup olmadığını araştırmak amacıyla yapılır. Eğer mümkün değilse, panel geometrisi önemli ölçüde değiştirilebilir. Bununla birlikte bu aşamada imalat bilgisinin az olması ve takım geometrilerinin henüz belirlenmemiş olması nedeniyle tam anlamıyla doğru bir simülasyon yapılamaz.



Şekil 2.1: Simülasyonların üretim sürecindeki rolleri [13]

Simülasyonların yapılmasının faydalı olacağı ikinci aşama panel bilgisinin daha çok detay içerdiği ve prototip kalıplarının yapımının mümkün olduğu aşamadır. Ancak

öncelik prototip olduğundan simülasyonlar tam anlamıyla gerçek çelik kalıpların imalatına yönelik değildir.

Bir sonraki aşamada artık panel bilgisi bilgisayar ortamında mevcuttur. Böylece çelik kalıpların tasarımına başlamak için gerekli olan çekme, kesme, flanş bükme, ütüleme gibi bazı proses aşamalarını simülasyonlar yardımıyla belirlenebilir. Yüzey geometrileri bu aşamada kolayca değiştirilebilir. Bu noktada simülasyon sistemlerinin ve bilgisayar destekli tasarım araçlarını birbiriyle ilişkisinin önemi ortaya çıkar. Eğer iteratif bir şekilde çok sayıda simülasyon yapıp buradaki öngörüler, bilgisayar destekli tasarım araçlarındaki geometriler hızla değiştirilebilirse hem zaman hem de emek açısından önemli tasarruflar elde edilir. Aynı durum kalıpların denemeleri neticesinde alınan sonuçların geri beslenmesi sırasında da yani 4 ve 5'inci aşamada da gündeme gelir. Kısaca her hangi bir aşamada karar verilen geometri değişikliklerinin mümkün olduğunca çabuk onaylanıp kalıpların yüzeylerine uygulanması gerekir.

Elbette simülasyon sonuçlarının panel geometrisini değiştirmek gibi ciddi bir sonuç doğuracak kadar doğruluğunun güvenilir olması gerekir. Bu, simülasyon programı kodlarının ne kadar iyi olduğundan, kullanıcının deneyimine kadar pek çok parametreye bağlıdır. Mevcut yazılımlar birbirlerine oranla bazı konularda iyi bazı konularda geridirler. Bu nedenle pek çok otomobil üreticisinde tek bir yazılımdan ziyade farklı yazılımlar aynı anda kullanılmakta, böylece gerçekçi simülasyon sonuçları bir kaç kanaldan doğrulanmaktadır.

BÖLÜM 3

SAC ŞEKİLLENDİRME SİMÜLASYONLARI İÇİN ÖRNEK VAKALAR

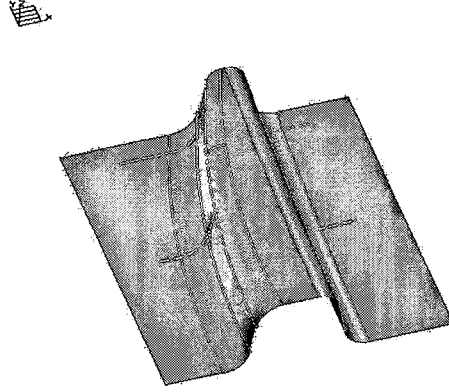
3.1 Kullanılacak Parçalar

Simülasyon yazılımları aynı amaç için yazılmış olsalar bile bazılarında yukarıda değinildiği gibi pek çok konuda farklılık gösterebilirler. Kullanıcı için bir yazılımın öğrenilmesi programlı bir süreçte olur. Bu süreç içinde üzerinde, öğrenilen uygulamaların mümkün olduğunca çoğunun uygulanabileceği örnek parçalar seçilir. Genelde üretilen gerçek bir parça arayışına gidilmeden ihtiyaca göre bir veya daha fazla parça tasarlanır. Bu yöntem yazılımlar arasında bir kıyaslama çalışması yapılacağı zaman da kullanılır. Hesaplama zamanlarını çok artırmayacak boyutta, araştırılan konuyu destekleyecek geometriye sahip parçalar seçilir veya yaratılır. Ancak böyle bir kıyaslama çalışmasında gerçekte de üretilecek bir parça seçmek çok daha akıllıca olur. Çünkü çalışmanın sonuçların gerçek panel üzerinde gözlemlemek çalışmayı daha anlamlı kılar.

3.1.1 Deneme Parçası

Bu proje boyunca üzerinde çalışma yapılacak AutoForm, OPTRIS, FAST 3D yazılımların öğrenilmesi için bir deneme parçası oluşturulmuştur. Genel formu Şekil 3.1 verilen bu parça hem hesaplama zamanını çok küçük tutacak şekilde gerçek panel boyutlarına oranla ufak, hem de geri yaylanma miktarı belirgin olacak şekilde şapka kesitli seçilmiştir. Ayrıca bu şapka kesitli parça ana eksen boyunda bir miktar kıvrılmaktadır. Bunun nedeni şapka kesitin iki boyutlu yapısının parçaya tamamen yansımaması, yani yapılacak simülasyonların 2 boyutlu simülasyon yapısından daha farklı bir yapıda olmasının arzulanmasıdır. Parçanın tek tesirli formda çekilerek çıkarılması yani erkek kalıp ve pot çemberi altta, dişi kalıp yukarıda olacak biçimde

şekillendirilmesi düşünülmüştür. Bu noktada flanş bölgeleri birbirinden ayrı iki pot çemberi olarak tanımlandı ve şekillenmemiş sac, parçanın sınırları kadar olacak şekilde seçildi. Pot çemberleri üzerinde orta şiddette süzdürme çubuğu mevcuttur.

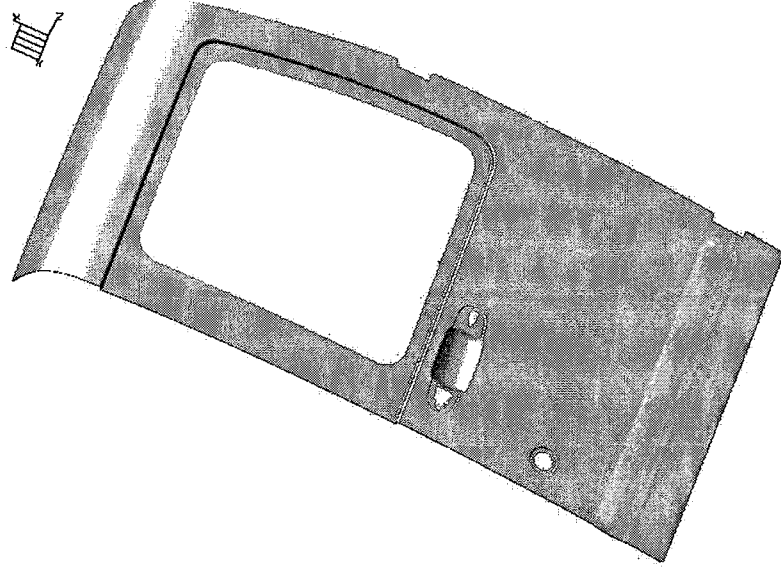


Şekil 3.1: Ön simülasyonlar ve yazılımların öğrenilmesi sırasında kullanılacak deneme parçası

Bu deneme parçasıyla ilgili simülasyonlara bu çalışmada değinilmeyecektir. Çünkü yapılan çalışmalar bir öğrenim sürecinde olduğundan gerçekçi bir netice taşımayabilir.

3.1.2 Gerçek Paneller

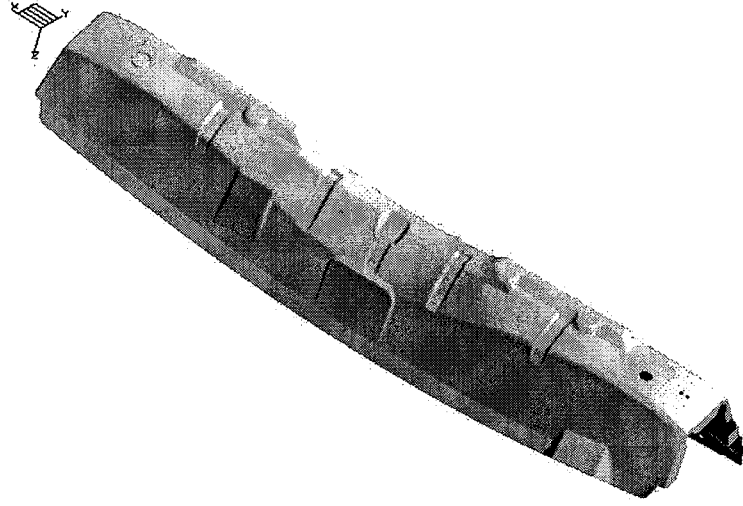
Bu proje içersinde bazı gerçek paneller seçilmiş olup çalışmalar ve uygulamalar bu paneller üzerinde yapılacaktır. Bunlardan ilki hafif, ticari amaçlı yolcu ve yük taşımak için tasarlanmış bir aracın arka kapı dış panel sacıdır. Bir dış panel olması nedeniyle panelin tasarım stüdyosunda tasarlandığı gibi üretilmesi zorunludur. Çünkü aracın satış esnasında müşteri tarafından nasıl algılanacağı bu tasarımdaki hatlarla belirlenir. Elbette bu tür panellerdeki saklanamayan bozulmalar, gerçek formdan farklı formlar müşteri tarafından fark edilebilir ve bu yüzden istenen satış rakamları elde edilemez. Bu panel Şekil 3.2’de görülmektedir.



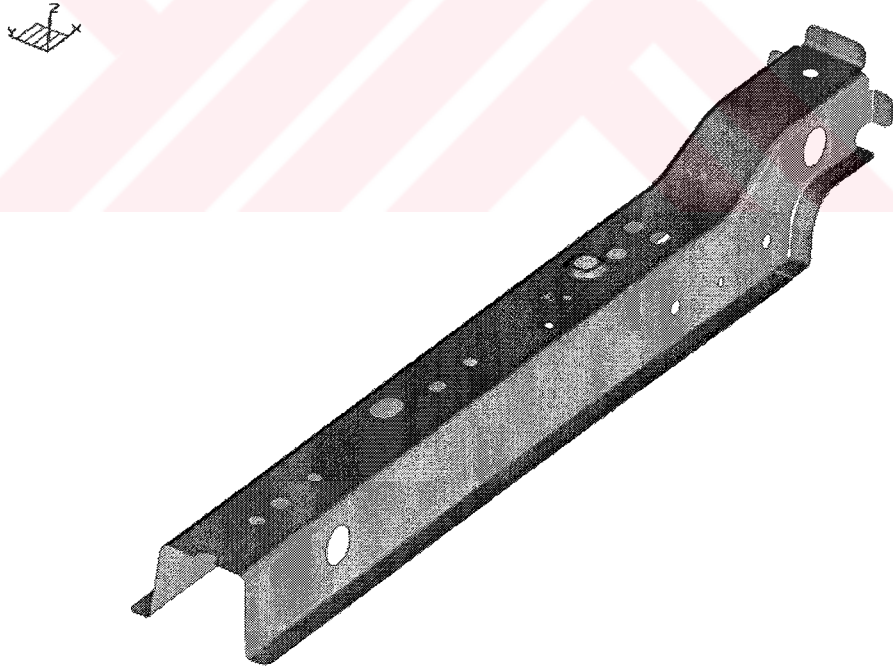
Şekil 3.2: Hafif ticari bir aracın arka kapı dış panel sacı

Üzerinde çalışılacak ve Şekil 3.3'teki gösterilen bir diğer panel ise yine aynı aracın ön göğüs panelidir. Bu panel gösterge panelinin hemen arkasında, U şeklinde bir paneldir. Bulunduğu yerin pek çok kontrol ünitesinin bağlantılarını içermesi nedeniyle üzerinde pek çok delik ve irili ufaklı form bulunmaktadır. Panel araç üzerindeyken bu formlar ve delikler, bulunması gereken 3 boyutlu koordinatta bulunmadığı takdirde montaj esnasında ciddi problemler yaşanacağı açıktır. Bu nedenle geri yayılanmanın bu panel üzerinde de gözlemlenmesi iyi olacaktır.

Şekil 3.4'te görülen üçüncü panel, bir aracın şasisi üzerinde yük taşımak üzere tasarlanmış şapka kesitli bir iç paneldir. Diğer panellere göre nispeten daha kalındır



Şekil 3.3: Hafif ticari bir aracın ön göğüs paneli



Şekil 3.4: Bir hafif ticari araca ait arka şasi kolu paneli

ve malzemesi form almaya daha dirençlidir. Aynı zamanda geri yaylanmanın en belirgin şekilde oluşması beklenen paneldir.

3.2 Kapalı Yöntemle Simülasyon

Kapalı yöntemle simülasyon için AutoForm V3.03 [5] yazılımı kullanılacaktır. AutoForm gayet kullanıcı dostu bir yazılım olması nedeniyle kullanıcı ile anlaşılır, kolay bir iletişim kurmaktadır. Avrupa'da hemen bütün önemli otomotiv üreticilerinin kullanımındadır.

Simülasyon hesaplaması RISC tabanlı HP C3600 iş istasyonunda yapılacaktır. Bu makinanın işlemci hızı 552 MHz ve ön belleği 1 GB'dir.

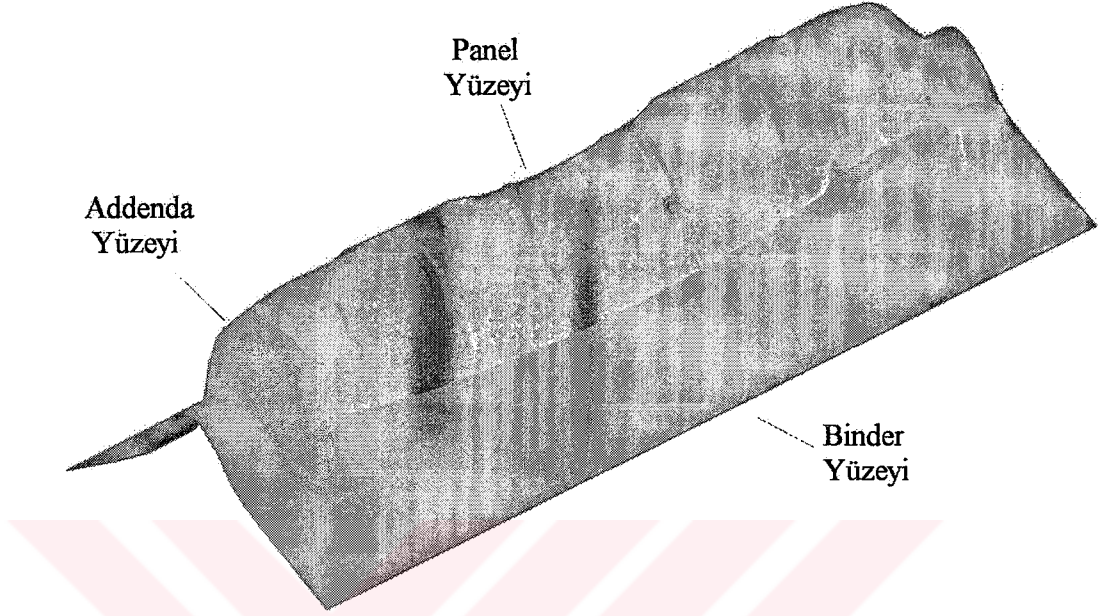
3.2.1 AutoForm Yazılımının Tanıtımı

3.2.1.1 Geometri

Panel geometrik bilgisinin AutoForm içine alınması birkaç formatta mümkündür. Bunlar VDA, IGES, STL, Nastran ve AutoForm geometri dosyası formatlarıdır. Panel bilgisiyle birlikte eğer tanımlanmışsa binder olarak adlandırılan pot çemberi yüzeyi ve panel ile bu yüzey arasındaki geçiş sağlayan addenda yüzeyi de aynı yolla program içine alınır. Bu noktada AutoForm içersine, bir kaç geometrinin, farklı adlarla birbirlerinden bağımsız olarak alınmasının mümkün olduğunu belirtelim.

Bu aşamadan sonra içeri alınan parça, geometri düzenleyici vasıtasıyla simülasyon amacına göre tanımlanır. Örneğin ilk etapta flanş geometri, veya binder geometrisi tanımlanabilir. Kullanılmayacak yüzeyler belirtilebilir. Daha sonra istenirse parçadaki belli bir yarıçapın altındaki filletlerin bulunması ve bunlara tanımlanan başka bir filletin otomatik olarak atılması sağlanabilir. Parçanın bulunduğu pozisyon eğer uygun değilse düzenlenebilir. Ters açılı bölgelere, yüzeylerin genel normal vektörlerine, veya minimum çekme derinliğe bağlı olarak yeni pozisyonlamalar yapılabilir. Parça üzerindeki delikler, pencereler kapatılabilir. Parça sınırları kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Eğer elde sadece panel bilgisi varsa AutoForm içinden addenda ve binder yüzeylerinin oluşturulması gerekir. Bunu için çekme derinliği, eğrilik yönü, maksimum yatayla eğim açısı gibi pek çok parametre tanımlanarak

otomatik olarak bir binder üretilir. Daha sonra bu binder ile panel yüzeylerini bağlayacak olan addenda da AutoForm içinden otomatik olarak üretilir.



Şekil 3.5: AutoForm Die Designer Modülünde yapılmış addenda ve binder yüzeyleri

Pek çok profil şablonundan yararlanmak mümkün olduğu gibi, duvar açısı, kalıp filleti yarıçapı, addenda yüksekliği, panelden düz uzaklık gibi değişkenlerle oynayarak isteğe göre farklı profiller üretilir. Aynı durum binder oluşturulmasında da mümkündür. Şekil 3.5’de bir aracın ön göğüs panelinin AutoForm içinde oluşturulmuş addenda ve binder yüzeyleri gösterilmiştir. AutoForm içersinde üretilmiş olan tüm bu yüzeyler IGES formatında çıktı verilebilir. Ancak bu yüzeyler henüz doğrudan diğer operasyonlarda kullanılabilecek olgunlukta yada kalitede olamamaktadır ve yakın gelecekte de olacağı şüphelidir. Sadece kaliteli yüzeylerin oluşturulmasında yönlendirici olarak kullanılabilirler.

3.2.1.2 Operasyon Tanımlanması

Parça bilgisi program içerisine başarıyla alınıp addenda ve binder yüzeyleri de tanımlandıktan sonra, sıra simülasyon parametrelerinin ve kalıp parçalarının

tanımlanmasına gelir. Bu işlem AutoForm içerisinde “Input Manager” yardımıyla yapılır. Bu menüden bazı alt menülere girilir ve simülasyon parametreleri bu menülerde tanımlanır.

AutoForm bu bölüme ilk kez giriliyorsa kalıbın tek yada çift tesirli olup olmadığını sac boşluğunun hangi kalıp parçasına verileceğini ve değerini sorar. Bunlar girildikten sonra öncelikle simülasyona bir isim verilir. Ardından kalıp üzerinde çalışacak parçalar içeriye alınmış geometriler yardımıyla oluşturulur. Kalıp parçasının ofset yönü, çalışma vektörü ve geometrisi burada tanımlanır. Geometrinin tanımlanması daha önce içeri alınmış olan geometrilerden yüzeyler ekrandan seçilmesi yoluyla olur.

Pot çemberi, alt kalıp veya dişi kalıp gibi parçalar tanımlandıktan sonra sıra malzeme özelliklerindedir. AutoForm kütüphanesinden standartlar içerisinde bir malzeme seçmek mümkün olduğu gibi, bambaşka bir malzeme tanımlanmasına da olanak vardır. Ancak bu zorunlu kalmadıkça başvurulmayan bir durumdur. Çünkü malzemenin pek çok özelliğinin, test sonuçlarının bilinmesi gerekir. Bu noktada ayrıca ham sacın ilk ebatları da tanımlanır. Bu dikdörtgen bir şekilde de olabilir açınım kesilmiş bir şekil de olabilir. Eğer hesaplama zamanından tasarruf etmek için simetrik bir parçanın sadece yarısı analize sokulacaksa, simetri düzlemi de burada tanımlanır. Ayrıca iki farklı malzemenin aynı anda çekilmesi için gerekli olan kaynak hattı ve ham sacda delik, boşluk gibi formlar da belirtilebilir.

Bir sonraki aşama, pot çemberi üzerindeki sacın akmasını kontrol etmek amacıyla kullanılan süzdürme çubuklarının tanıtılmasıdır. Süzdürme çubukları 3 boyutlu geometrileri modellenerek tanımlanmazlar. Onun yerine eksen çizgileri belirtilir ve hesaplamalar bir basma kuvveti olarak yansır. Bu sayede hem modellemek için eleman tanımlamak gerekmez hem de yeri veya kuvvetini değiştirmek çok daha kolay olur. Eksen çizgileri harici bir CAD sisteminden alınarak veya AutoForm içinde kabaca çizilerek oluşturulabilir. Bu esnada şiddetini belirtmek için bir katsayıda girilir. Bu durum hem hemen tüm yazılımlarda böyledir. Ancak katsayıların birbirleriyle uyumsuzluğu bir problemdir. Bu konu ilerdeki simülasyonlarda ele alınacaktır.

Sac, imalatçısından korozyona karşı koruyucu bir yağ tabakasıyla gelir ve çoğu zaman bu tabakayla birlikte basılır. Bazen özellikle derin çekmelerde basılmadan önce yeni bir yağ sürüldüğü olur. Kalıp parçaları belli oranda parlatılarak pürüzsüzlük elde edilmeye çalışılır. Tüm bu öğeler kalıptaki sacın sürtünme katsayısını belirler. Genelde deneysel olarak bulunmuş bir kaç değerden uygun olanı seçilerek bu katsayı tanımlanır.

Bu aşamalardan sonra operasyon çeşitlerinin, hareketlerinin, basınçlarının ve diğer parametrelerinin tanıtılması gerekir. Genel olarak ilk aşama sacın yer çekimi kuvvetiyle, yani kendi ağırlığı ile kalıba yayılmasıdır. Bu noktada sadece sacın üzerine yayılacağı kalıp tanımlanır. Ayrıca ihtiyaç duyulursa sacı belli pozisyonda tutmak üzere dayamalar da tanımlanabilir.

Daha sonra tutma aşaması tanımlanır. Aktif olan parçalar ve bu parçaların hızları tanımlanır. Sözelimi alt pot çemberi aktif durumda ve sabit, üst dişi kalıp v hızıyla t saniye (-z) yönünde yol alır gibi.

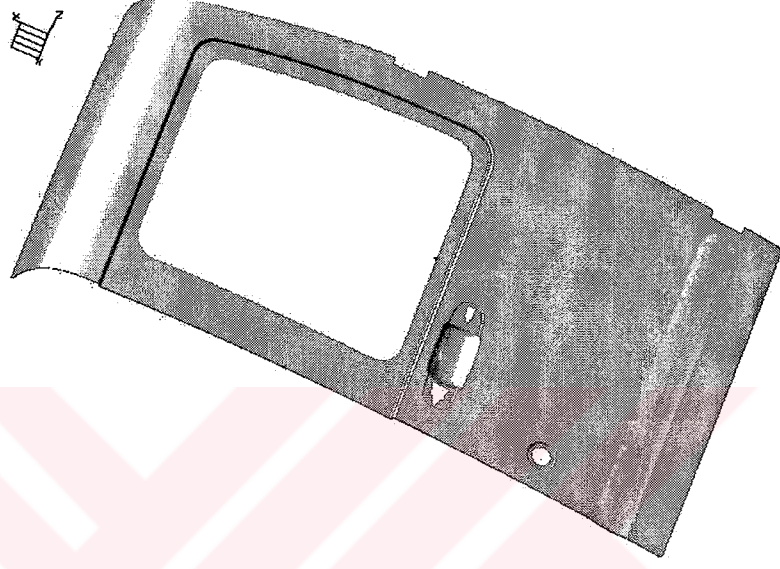
Sıra artık ana operasyona gelmiştir. Bu genellikle çekme operasyonudur ancak ütüleme, kesme, flanş bükme operasyonları da tanımlanabilir. Yukarıdakilere ilaveten operasyonla ilgili diğer parametreler belirlenir. Sözelimi çekmede pot çemberi basıncı, kesmede kesme hattı gibi. Bu operasyonlar ara arda tanımlanmaya devam edilebilir. Yani bir kaç kalıpta yapılan çekme, kesme, ütüleme operasyonları ardışık olarak çalıştırılabilir. Ayrıca geri yaylanma hesaplaması da bu kısımda ayrı bir operasyon gibi sıraya konabilir.

Son olarak kontrol parametreleri girilir. Genelde fabrikasyon değerler kullanılır. Bu noktada raporlanacak sonuçlardan hangilerinin hesaplanacağı da seçilebilir. Çoğu zaten seçili olan bu sonuçlardan bazılarını saymak gerekirse, kalınlık, incelme, majör uzuma, kırışma kriteri ilk akla gelenleridir.

3.2.2 Arka Kapı Dış Panelinin Kapalı Yöntemle Simülasyonu

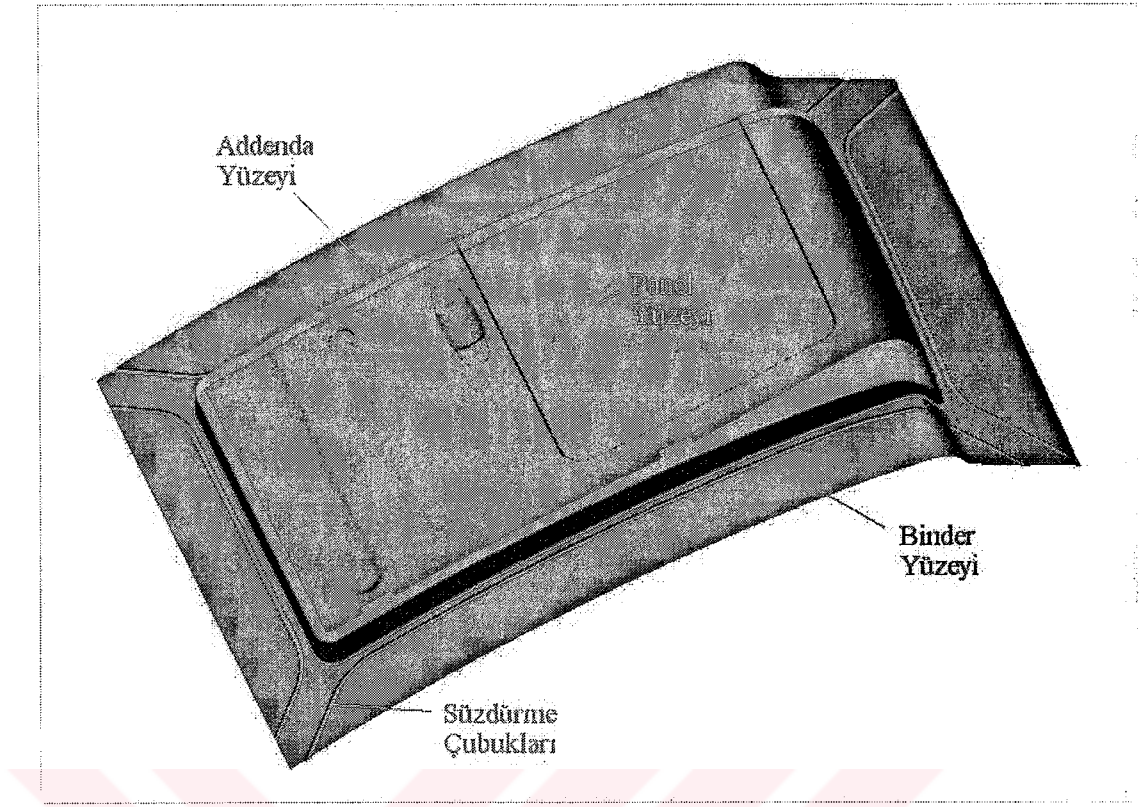
Söz konusu bu panel daha önce bahsedildiği gibi yolcu ve/veya yük taşımak üzere tasarlanmış bir aracın arka kapı dış panelidir. Araçta bu kapıdan sağ ve sol olmak üzere iki adet bulunmaktadır. Ayrıca aracın değişik modellerine göre farklı şekillerde

de olabilmektedir. Panelin kabaca üç boyutu 180x695x1270 mm'dir. Sac kalınlığı 0.8 mm'dir. Sac malzeme olarak DIN standartlarındaki Zste 260P seçilmiştir. Bu kapılar kullanılarak araca arkasından yükleme ve boşaltma yapılmaktadır. Bizim simülasyonlarımızda kullanacağımız pencereli sağ kapıdır ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Hafif ticari bir aracın arka kapı dış panel sacı

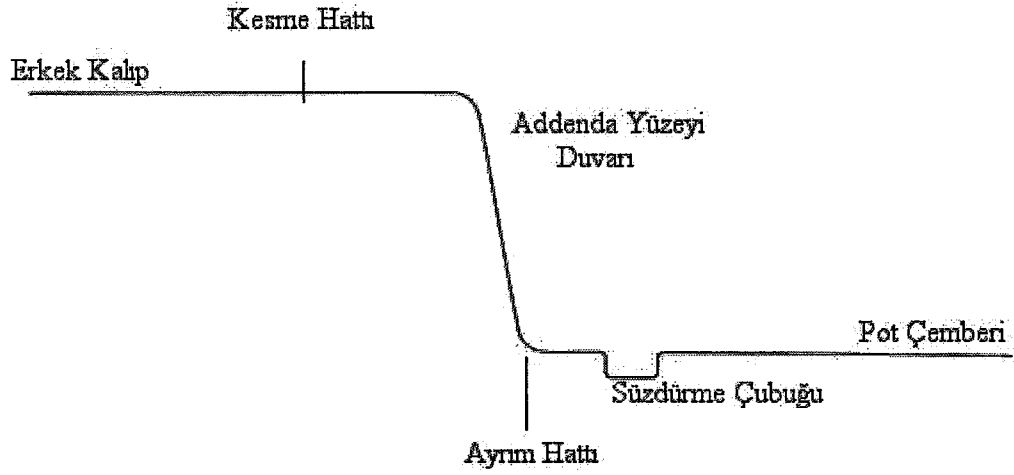
Şekilde görüldüğü gibi panelin üzerinde iki küçük çöküntü, pencere yuvası ve bir enine kanal bulunmaktadır. Ayrıca parçanın tüm kenarları boyunca değişen ölçülerde flanş bulunmaktadır. Bu flanş dış panel iç panelle montaj edildiğinde iç panelin üzerine kapanarak ezilir. Çekme kalıbı geliştirilirken bu flanşlar açık vaziyette, pencere bölgesi ve diğer tüm delikler sacla kapalı bir şekilde düşünülür (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Arka kapı dış panelin çekme kalıbında addenda ve binder modellemesi

Kalıp tek tesirli olarak basılacaktır. Yani presin alt tablasında pot çemberi ve erkek kalıp varken, presin üst tablası üzerine üst (dişi) kalıp bağlanacaktır. Pot çemberi ve erkek kalıp birbirlerinden ayırım hattıyla ayrılırlar ve bu hat üzerinde belli bir boşlukla çalışırlar. Bu hat, genelde olduğu gibi bu kalıpta da addenda yüzeyi duvarının binder yüzeyi (pot çemberi yüzeyi) ile kesişim çizgisidir (Şekil 3.8)

Yine genelde olduğu gibi mümkün olduğunca düz tutulmaya çalışılmıştır. Çünkü sacın erkeğin hareketiyle akması bu hat üzerinden olacaktır. Ayrıca tutma operasyonu sırasında bu hattın dışında kalan binder yüzeyleri kullanılacaktır. Bu da sağlıklı bir tutma açısından önemlidir. Süzdürme çubukları ise ayırım hattından sonra pot çemberi üzerinde emniyetli bir mesafede tasarlanır. Genelde şekli ve şiddeti denemelerle kesinleştirilir. Ancak daha önce belirtildiği gibi simülasyonlar sırasında 3 boyutlu model olarak değil sadece tutma kuvveti etkisi olarak hesaplamalara katılacaktır. Daha sonra kalıp imalatında simülasyonlarda belirlenen eksenler üzerine CAD ortamında tasarlanıp, pot çemberi yüzeyine eklenirler.



Şekil 3.8: Erkek kalıp ile pot çemberi arasındaki ayırım hattı

İlk anda pot çemberi presin alt çıkarıcı yastığı üzerinde, erkek kalıptan yukarıda durmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Arka kapı dış panelin çekme kalıbı yüzeylerinin açık halde yandan görünüşü

Üst kalıbın aşağı inmesiyle sacı yakalamakta, ve bu sırada üst koçun kuvveti alt yastığın kuvvetini yenerek beraberce aşağıya doğru ilerlemektedirler. Şekil 3.10'da tutma esnasındaki kalıp parçalarının konumu verilmiştir.



Şekil 3.10: Tutma esnasında kalıp parçalarının konumu

Bu sırada oluşan basınç sacı tutma basıncı yani pot çemberi basıncıdır. Bu basınç değiştirilerek sacın daha kolay akması yada daha zor akması sağlanabilir. Bu noktadan sonra presin üst tablasına bağlı kalıp alt erkeğin üzerine kapanır. Kapanma sırasında sacın arada ezilmeden durabilmesi için üst yada alt kalıp yüzeyinden birisi sac kalınlığı kadar bir boşluk verilerek işlenir. Tablo 3.1'de arka kapı dış panele ait genel özellikler belirtilmiştir.

Tablo 3.1: Arka kapı dış panelin özellikleri

PARÇA ÖZELLİKLERİ			
Parça Adı	Arka kapı dış panel	Çekme Tipi	Tek Tesirli
Parça Ebatları	180x695x1270	Maks. Çekme Derinliği	86 mm
Malzeme	Zste 220P	Maks. Add. Derinliği	86 mm
	Uzama Min.%26	Duvar Açısı (min/max)	7.0/10.0
Çekme Muv.	Re/Rp 0.2 (Mpa)= 220/300	Açınım Kesme	Yok
Sac Kalınlığı	0.8	Ham Sac Ebatı	900x1510

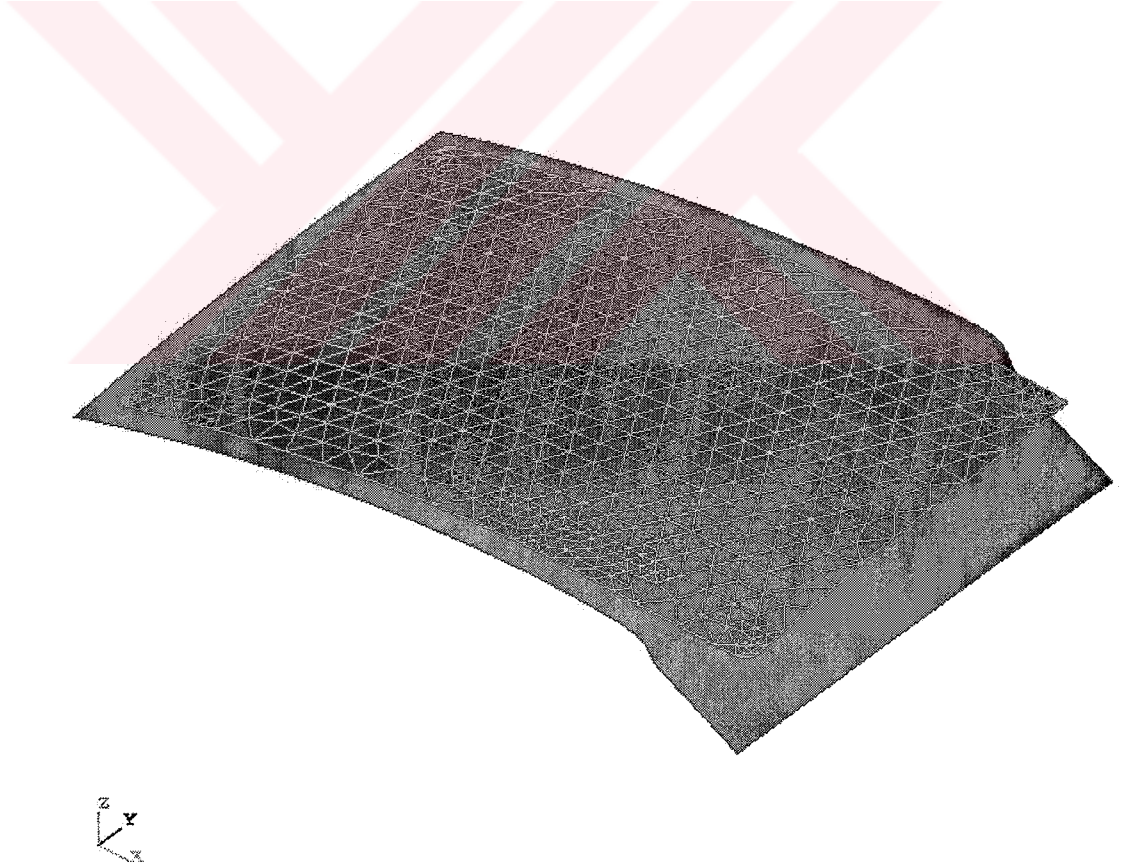
Genel özellikleri verilmiş olan arka kapı dış panelinin simülasyon aşamaları;

1. Sacın kalıba bırakılması
2. Tutma
3. Çekme
4. Geri yaylanma

şeklinde tasarlanmıştır.

3.2.2.1 Sacın Kalıba Bırakılması

Bu aşamada sac altta pot çemberi üzerine bırakılmaktadır. Yukarıda belirtilmiş ölçülerdeki ham sacın ağırlığı yaklaşık 9 kg'dır. Yer çekimi etkisiyle sac üzerine

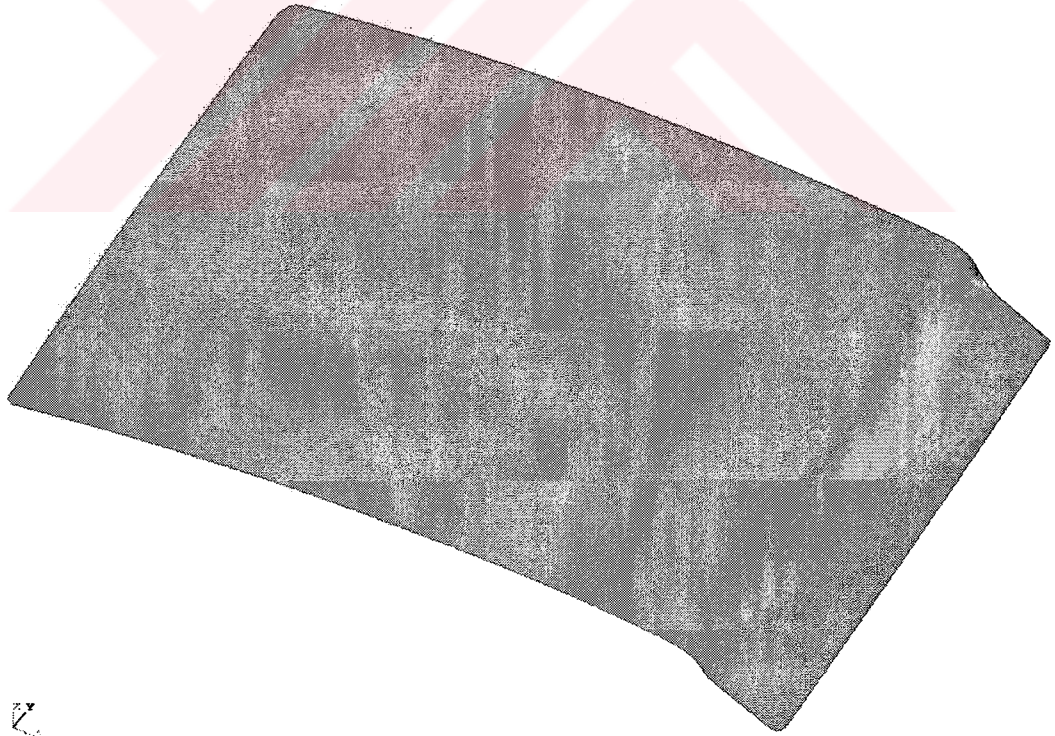


Şekil 3.11: Sacın kalıba konması

konduğu geometrinin doğrultusunda Şekil alır. Bu operasyon için AutoForm'un modellediği elemanlar üçgen kabuk elemanlardır. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi model genel olarak hep aynı boyutta elemanlardan oluşmaktadır. Sadece sınır çizgileri boyunca eğrilik artığında eleman sayısı artarken boyutu küçülür. Bunun amacı eğri geometriyi belirli bir minimum hatayla ifade edebilmektir. Őekle dikkat edilirse sacın n bölgede pot çemberi ile temas etmekten çok uzak olduğu görülür. Sacın yapısal özelliklerine göre deđiŐebilen bir davranıŐ olan bu durum eğer kontrol edilmezse sacın kalıp üzerinde tutma aŐamasına kadar kararlı bir halde duramamasına neden olur. Bizim örneğimizde böyle bir sorun oluşmamaktadır.

3.2.2.2 Tutma

Tutma sırasında st kalıp alttaki pot çemberi üzerine kapanır. st pres tablası presin alt yastığına karşı basınç uygulamaya başlar ve bu da sacı tutan kuvveti oluşturur. Simülasyonlarda bu kuvvet sacın akmasını kontrol etmek için sıkça deđiŐtirilen önemli bir parametredir. Bu esnada mümkün olduğunca küçük gerilme veya



Şekil 3.12: Tutma esnasında sacın görünümü

kırılganlık oluşmasına çalışılmalıdır. Şekil 3.12’de tutma esnasında hafif gerilme oluşun bölgeler görülmektedir.

Bu panel, binder yüzeyinin neden mümkün olduğunca düz oluşturulması gerektiğini gösteren iyi bir örnektir. Ancak bu panelde çekme derinliğini mümkün olduğunca sabit tutmak, ve böylece yan duvarlardaki yırtılmaları engellemek için üzerinde belli bölgede eğrilik olan bir binder yapılması gerekmiştir.

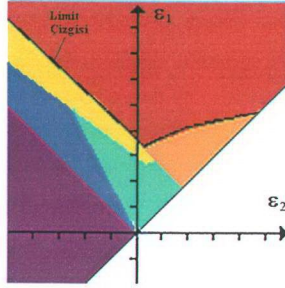
3.2.2.3 Çekme

Çekme daha önce belirtildiği gibi pot çemberi ve üst kalıbın kapanmasından sonra beraberce alt erkek kalıbın üzerine inmesiyle olur. Sac bu esnada pot çemberi basıncının ve süzdürme çubuklarının müsaade ettiği oranda erkek kalıp üzerine akarak sıvanır. Çekme operasyonu 100 mm olarak tanımlanmıştır. Yukarıdaki tabloda çekme derinliğinin maksimum 86 mm olarak verildiği göz önüne alınırsa aradaki fark, erkek kalıbın saca değmeden önce aldığı yoldur.

AutoForm sonuçların değerlendirilmesinde kullanıcıya, pek çok parametrenin tek bir görüntüde birleştirildiği bir şekillenme resmi sunmaktadır. Bu resimdeki renkler farklı anlamlar ifade ederken aynı zamanda farklı parametreleri de yorumlamaktadırlar. Bir sonraki aşamaya geçmeden şekillendirme sınır diyagramından (FLD-Forming Limit Diagram) bahsetmek yerinde olacaktır.

Sac metal üzerinde şekillenmeden önce hayali daireler olduğu düşünülür. Sac şekillenmeye başladığında bu daireler elipse dönüşürler. İşte bu elipsin uzun eksenindeki uzamalarına majör uzama, kısa eksendekilere minör uzama denir. Majör uzamaların y eksenini, minör uzamaların x eksenini oluşturduğu bir grafik çizilir ve şekillendirme sınır diyagramı olarak anılır. Malzemenin özelliklerine göre belli noktalardan sonra sac yırtılmaya başlar. Bu noktalar grafik üzerinde bir hat oluşturur. Bu hatta da şekillendirme sınır çizgisi denir. Diyagramdaki dikey eksenin solundaki bölgede minör uzama negatiftir ve bu malzemenin bir yönde uzarken ona dik yönde daraldığını gösterir. Minör uzama hiç bir zaman majör uzamayı geçemeyeceğinden x ve y pozitif eksenlerin açtığı ortayının altındaki bölgelerde her hangi bir grafik bilgisi

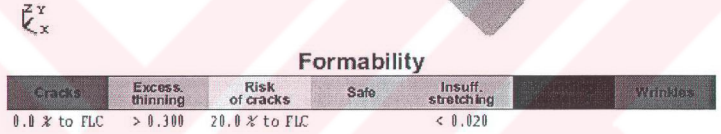
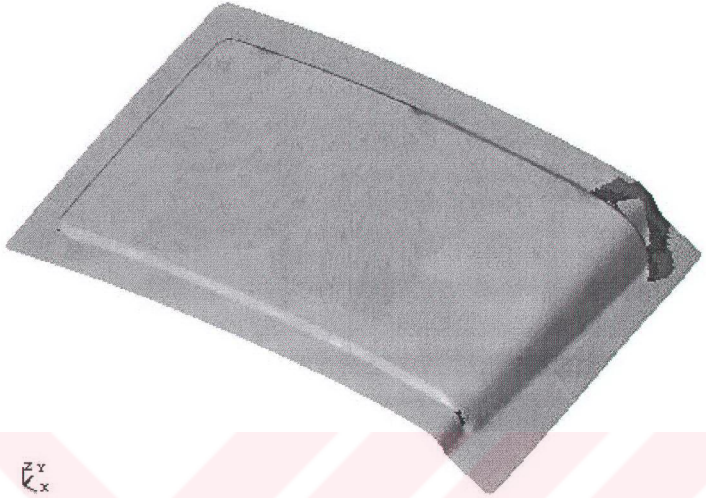
oluşmaz. AutoFormun bu kuralları esas alarak oluşturduğu renkli şekillendirme sınır diyagramı Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Şekillendirme sınır diyagramı

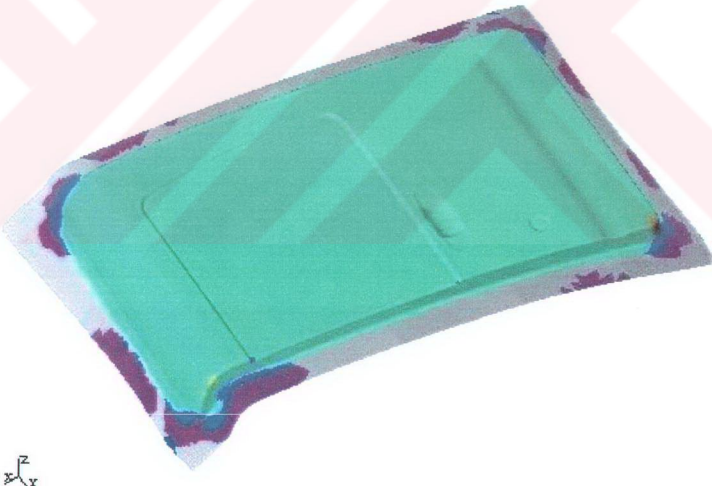
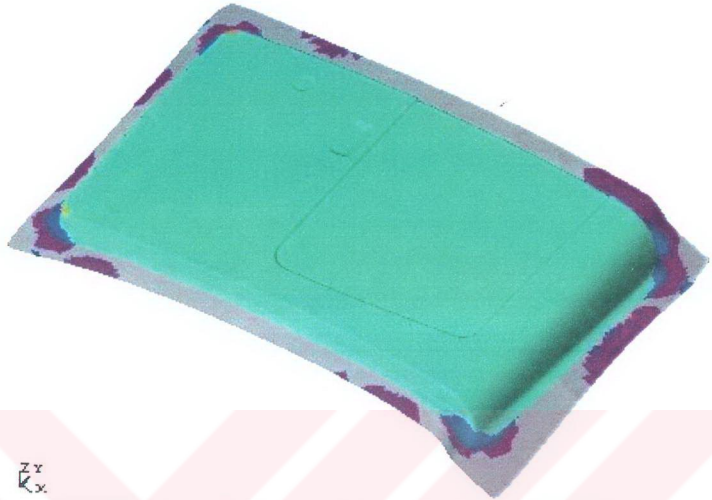
Çekme devam ederek sacı erkek kalıbın üzerine sıvar. Bu esnada malzeme elastik bölgesi aşılmış ve malzemede plastik şekillenmeler oluşmaya başlamıştır. Şekil 3.14’te erkek kalıbın saca değdikten sonraki ilk 64 mm’lik ilerlemesi sırasında sacın şekillenmesi gösterilmektedir.

Kırmızı bölgeler şekillendirme sınır diyagramının limit çizgisinin üstünü ifade eder. Kavuniçi yüzde olarak incelmenin % 30 değerini geçtiği nokta olarak belirlenir. FLD diyagramındaki limit çizgisinin % 20’sindeki değerleri gösterir. Yeşil bölge incelmenin ve diğer parametrelerin nominal değerlerde olduğu bölgedir. İncelmenin % 2 değerinin altında olan bölgeler yetersiz gerilmeyi ifade ederken, mavi renkli bölgeler kırışma eğilimini belirtir. Mor renk ise kırışma oluştuğunda belirir ve mavi renk gibi o da şekillendirme sınır diyagramını baz alır. Bu bilgilerin ışığında Şekil 3.14’e dikkat edilirse panel üst ve alt bölgede yeterli gerilmeyle incelmeye başlamışken, orta bölgede henüz yeterli gerilme oluşmamıştır. Pot çemberinin eğiminin arttığı bölgede ise bazı ufak kırışmalar oluşmaktadır.



Şekil 3.14: Çekme esnasında ilk 64 mm'de sacın form durumu

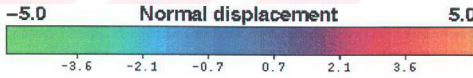
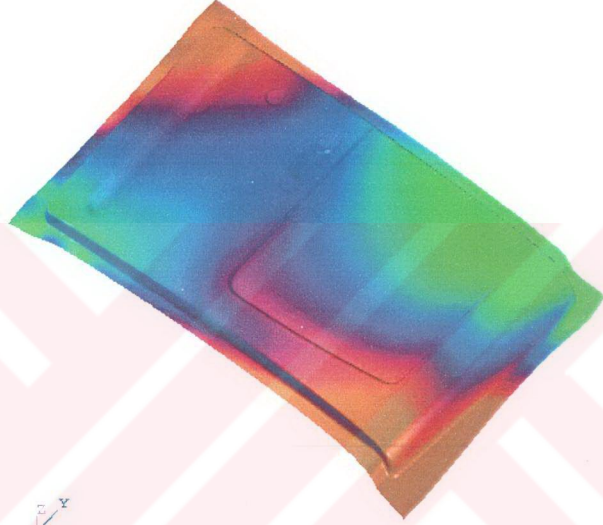
Çekme operasyonun son halindeki sacın şekillenme durumu Şekil 3.15'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi dörtgensel olan panelin tüm köşelerinde oluşması doğal olan kırışmalar oluşmuştur. Ancak bunlar panelin sınırlarının içine girmediğinden çok operasyonun başarısını çok fazla etkilemez. Panelin tamamı plastik değişime uğramıştır (minimum kalınlık 0.55 mm). Diğerine göre daha derin olan uzun duvardaki köşelerde incelleme kritik değerle ulaşmıştır. Buna rağmen genel olarak başarılı bir çekme operasyonu sağlanmıştır.



Şekil 3.15: Çekme operasyonun sonunda sacın form durumu

3.2.2.4 Geri Yaylanma

AutoForm'da geri yaylanma hesaplaması kullanıcıya fazla seçenek bırakmayan bir şekilde çalışmaktadır. Sadece hesaplama bittikten sonra panel üzerindeki bazı



Process step: springback, Process time: 700.000 Jan 21 06:46:47 2002
V40026-Arka kapi dis panel (mergeldi, 2001)



Şekil 3.16: Çekme operasyonunun sonunda sacın geri yaylanma diyagramı

noktalarda sabitlenmiş pimler tanımlayıp bu noktalar mümkün olduğunca sabit kalacak şekilde bir geri yaylanma hesaplatılabilmektedir. Ancak eğer bu noktalar verilmezse dahi AutoForm geri yaylanma sonucunda oluşan deformasyonu hesaplamaktadır. Şekil 3.16'da sacın çekme sonundaki formuna kıyasla, üzerindeki yükler kalktıktan sonra oluşan sac elemanının normali yönündeki deformasyonları

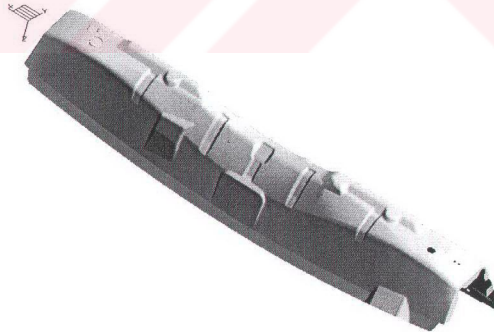
görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi bu deformasyonlar maksimum 5 mm ve minimum -5 mm olarak hesaplanmıştır. Panelin bazı bölümlerinin neredeyse hiç geri yaylanmadığı, ve bazı bölgelerinin her iki yanında farklı yönlere geri yaylanmaların olduğu görülmüştür.

3.2.3 Ön Göğüs Panelinin Kapalı Yöntemle Simülasyonu

Bir önceki panele ait simülasyon aşamaları detaylı verildiğinden, bu noktadan sonraki simülasyonlar daha sade anlatılacaktır. Bunlardan ilki hafif ticari bir vasıtaya ait ön göğüs panelidir. Panelin genel görünüşü Şekil 3.16'da ve temel parametreleri tablo 3.2'de verilmiştir.

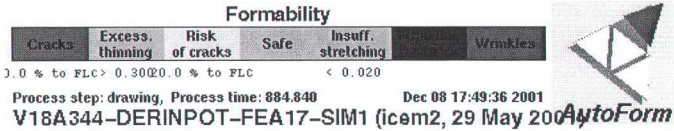
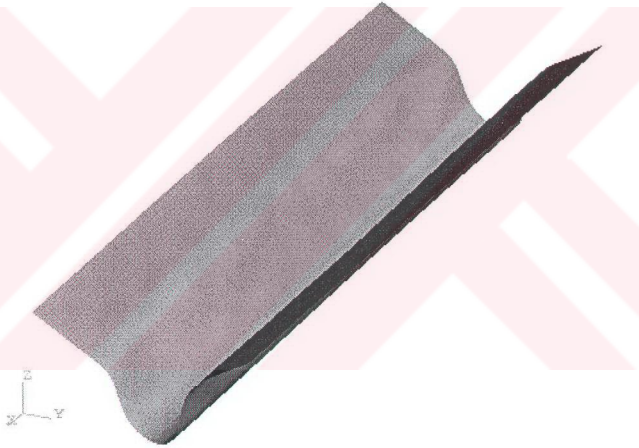
Tablo 3.2: Ön göğüs panelinin özellikleri

PARÇA ÖZELLİKLERİ			
Parça Adı	Ön Göğüs Paneli	Çekme Tipi	Çift Tesirli
Parça Ebatları	1320x225x231 mm	Maks. Çekme Derinliği	235 mm
Malzeme	FeP04A	Maks. Add. Derinliği	60 mm
	Uzama Min.%38	Duvar Açısı (min/max)	7/10
Çekme Muv.	Re/Rp 0.2 (Mpa)= 140/270	Açınım Kesme	Yok
Sac Kalınlığı	0.8	Ham Sac Ebatı	1500x370



Şekil 3.17: Ön göğüs paneli

Ön göğüs paneli çift tesirli çekilmektedir. Yani erkek (punch) üsttedir ve pres koçunun üzerinde birbirine göre göreceli iki hareket vardır. Önce pot çemberinin inmesinin ardından, erkek kalıp iner. Ayrıca bu operasyonda özel bir durumun uygulamasına da rastlamaktayız. Panel çekme derinliği fazla olduğundan tutma aşamasından önce erkek kalıp saca dokunacak şekilde erken girerek, içeri bölgede fazla sac toplanmasına neden olmaktadır. Bu sayede derin çekme için gerekli malzeme toplanmış olmakta ve yırtılma riski azalmaktadır (Şekil 3.18). Panel genel olarak başarılı bir şekilde çekilmiştir. Sadece orta bölgede düşük şiddette ve pot çemberi köşelerinde orta şiddette kırışma oluşmuştur. Pot çemberi üzerindeki trim hattı dışında olduğundan kabul edilebilirdir. Şekil 3.19’da bu durum görülmektedir. Ancak daha açık bir ifade için tek tesirliymiş gibi görüntülenmiştir.



Şekil 3.18: Ön göğüs paneli tutma aşaması



Şekil 3.19: Ön göğüs paneli çekme sonu

Bu panele ait geri yaylanma hesaplaması da yapılmıştır. Bu bilgi gerçek panel ile karşılaştırmalı olarak Bölüm 4'te kesitler üzerinde verilmiştir.

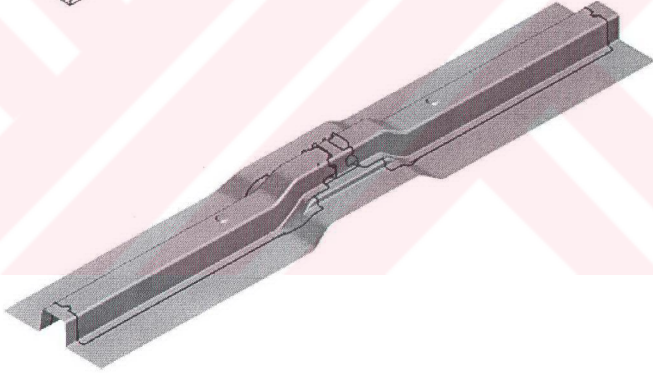
3.2.4 Arka Şasi Kolu Panelinin Kapalı Yöntemle Simülasyonu

Arka Şasi Kolu Paneli örnek paneller içinde belli bir formu temsil etmekten ziyade yük taşımak amacıyla tasarlanmış tek paneldir. Ayrıca en kalın saclı örnek panelimizdir. Malzeme özellikleri de diğer panellere göre bu anlamda farklılık gösterir. Yani daha yüksek akma mukavemetleri daha düşük uzama limitleri gibi. Tablo 3.3.

Tablo 3.3: Arka şasi kolu panelinin özellikleri

PARÇA ÖZELLİKLERİ			
Parça Adı	Arka Şasi Kolu Paneli	Çekme Tipi	Tek Tesirli
Parça Ebatları	1024x215x86	Maks. Çekme Derinliği	80 mm
Malzeme	Zste 220P	Maks. Add. Derinliği	20 mm
	Uzama Min.%26	Duvar Açısı (min/max)	5
Çekme Muv.	Re/Rp 0.2 (Mpa)= 250/300	Açınım Kesme	Yok
Sac Kalınlığı	1.25	Ham Sac Ebatı	1150x350 mm

Çekme kalıbı tek tesirlidir Sağ ve sol olarak tasarlanmış olan panel uc uca birleştirilerek tek parçaymış gibi çekilmektedir (Şekil 3.20). Pot çemberi sadece iki yanda tutma yapmakta uzun eksen uçlarında sac tutulmamaktadır. Ayrıca çekme derinliği nedeniyle iki yanda derin bölgeler çekme kalıbında yumuşak geçilerek , ütüleme kalıbına bırakılmıştır.

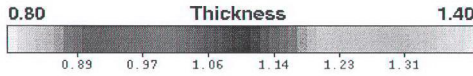
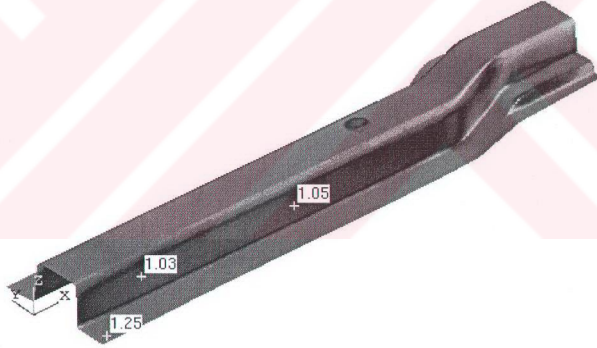


Şekil 3.20: Arka şasi kolu paneli çekme kalıbı

Simülasyonlar açısında zaman tasarrufu sağlamak amacıyla panel uzun ekseninde simetrik düzleminden kesilerek tek parça olarak hesaplatılmıştır. Bu esnada simülasyon yazılımı tanımlanan simetri düzleminde sınır koşullarını elemanlar devam ediyormuş gibi hesaplar, yani hesaplamaların doğruluğunda bir kayıp oluşmaz (Şekil 3.21).



Şekil 3.21: Arka şasi kolu paneli çekme simülasyonu simetri düzlemi



Process step: drawing2, Process time: 400.000 Dec 09 12:42:48 2001
V10126-7-A-sim38



Şekil 3.22: Arka şasi kolu paneli çekme simülasyonu kalınlık diyagramı

Çekme neticesinde panel başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Yan duvarlarda incelemeler minimum 1.03 değerine inmiştir (Şekil 3.22). Paneldeki geri yaylanmalar da hesaplanmış ve simülasyon sonuçları bölümünde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

3.3 Dinamik Açık Yöntemle Simülasyon

Açık yöntem daha önce belirtildiği gibi doğruluk oranı daha iyi sonuçlar vermektedir. Ancak hesaplama süreleri çok daha uzundur. En azından burada kıyaslayabileceğimiz OPTRIS ve AutoForm için durum böyledir. Ford Otosan'da bu iki yazılım avantajlarından yararlanılacak şekilde uyumlu bir biçimde kullanılmaktadır.

Erken aşamalarda hızlı ve çok sayıda simülasyon AutoForm ile yapılırken, sürecin sonuna doğru en iyi sonuç alınan parametreler ve yüzeylerle OPTRIS'te analiz yapılmaktadır. Bu sayede hem hız hem de doğruluk elde edilmektedir. OPTRIS'te en başarılı simülasyonun koşulması gerçekten önemlidir. Çünkü bazı paneller geri yaylanma analizi de dahil olmak üzere 100~110 saat sürebilmektedir. Dolayısıyla yararlı olmayacak bir simülasyon 1 haftalık kayba neden olabilmektedir.

Simülasyon hesaplaması RISC tabanlı HP C3600 iş istasyonunda yapılacaktır. Bu makinenin işlemci hızı 552 MHz ve ön belleği 1.5 GB'dir.

Açık yöntemle simülasyon yapılırken OPTRIS V6.01 [6] programı kullanılacaktır. Son dönemde Pam-Stamp yazılımının sahibi olan ESI gurubu tarafından satın alınmış olan bu program, uzun hesaplama sürelerine ve nispeten karmaşık kullanıcı arabirimlerine rağmen yüksek doğruluk oranlı simülasyonlar yapmasıyla, sektör içinde saygın bir yere sahiptir. OPTRIS yazılımı ve açık yöntem tanıtılırken, kapalı yöntemle analiz aktarılırken değinilmiş olan genel simülasyon aşamaları burada tekrar verilmeyecektir. Bunun yerine farklı olan uygulamalar ve yöntemler aktarılacaktır.

3.3.1 OPTRIS yazılımının Tanıtımı

3.3.1.1 Geometri

OPTRIS CAD bilgisini IGES, VDA, Unisurf ve kendi formatı olan Binary Feature olarak alabilmektedir. Okunan bu geometrinin elemanlara dönüştürülerek ifade edilmesini ise DELTAMESH adlı bir modül sağlamaktadır. Ayrıca yüzey ,çizgi gibi geometrik cisimler filtre edilebilmektedir. Daha sonra bu yapı birbirine, belirlenebilecek bir mesafe toleransı gözetilerek birleştirilmektedir. Oluşturulacak ağ yapısına ait diğer parametreler ise, maksimum ve minimum eleman kenar uzunlukları, geometri bilgisinden sapma toleransı ve elemanlar arasındaki maksimum açıdır.

Ağ oluşturma algoritması parametric, uniform, ve progresive olmak üzere üç tiptedir. Bunların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları aşağıdaki tablo 3.1’de verilmiştir.

Parametric yöntem genelde takımların tanımlanmasında tavsiye edilirken, uniform yöntem parametric yöntemin başarısız olduğu yerlerde önerilmektedir. Progressive tipte ise küçük geometrik kenarlar eleman sayısının artmasına ve kenar ebadının düşmesine sebep olduğundan daha dikkatli olunmalıdır.

Tablo 3.4: OPTRIS eleman oluşturma teknikleri

	Parametric	Uniform	Progresive
Avantajlar	Geometriyi takip eder. Elemanlar bir yönde uzatılabilir.	Düzgün şekiller. Geometrik hatalara karşı duyarsızdır.	Değişken eleman boyutu. Düzgün şekiller
Dezavantajlar	Geometrik hatalara karşı duyarlı.	Geometrik hatlar korunmayabilir. Yüzeydeki eleman ebadı sabit tutulur.	Küçük kenarlara karşı duyarlıdır. Geometrik hatlar korunmayabilir.

3.3.1.2 Operasyon Tanımlanması

OPTRIS'te yapılabilecek simülasyonlar, birbirine tutturulmuş iki farklı sacı tek kalıpta çekme simülasyonu, perçinlenmiş veya kaynakla birleştirilmiş iki ayrı kalıpta iki ayrı çekme simülasyonu, tüp eğme simülasyonu, tüp hidroform simülasyonu, flanş bükme ve flanş kapama simülasyonları olarak sayılabilir. Çekme operasyonu içersinde geri yaylanma hesaplaması da yapılabilmektedir. Ayrıca kesme operasyonu da mevcuttur ancak bu işlem sırasında sonlu elemanlarla bir malzeme etkileşim denklemi kurulmadığı ve çözümleme yapılmadığından gerçekçi bir simülasyon olarak gösterilmez. Yapılan eleman ağ yapısının sınırlarının tekrar belirlenmesidir. Çekme operasyonunun tanımlanması için gerekli bilgiler şu şekilde gruplandırılabilir.

Takım için;

CAD Bilgisi, minimum çekme radiusu, dayama pozisyonları, süzdürme çubuğu geometrisi ve pozisyonu

Sac için;

Malzeme bilgisi, malzeme kalınlığı, sac ebadı

Proses için;

Çekme yönü, hesaplama yöntemi (hızlı, doğru, geri yaylanmalı), sürtünme katsayısı, kesme hattı ve doğrultusu, pot çemberi basıncı bilgileri gereklidir. Çekme simülasyonu basamaklar şeklinde hesaplandığından ara aşamalardaki sac ağ yapısı başka bir simülasyonda kullanılabilir.

Bu tanımlamalar yapılırken OPTRIS kullanıcıya bazı kolaylıklar sunmaktadır. Örneğin kalıp tanımlanırken keskin kenarlara belli bir değerde filet atılabilmektedir. Yine kalıp parçalarının sınırlarına küçük duvarlar çok kısa sürede oluşturulabilmektedir. Bu duvarlar ayırım hattı bölgesinde aşırı kırışma oluşması sırasında faydalı olmaktadır.

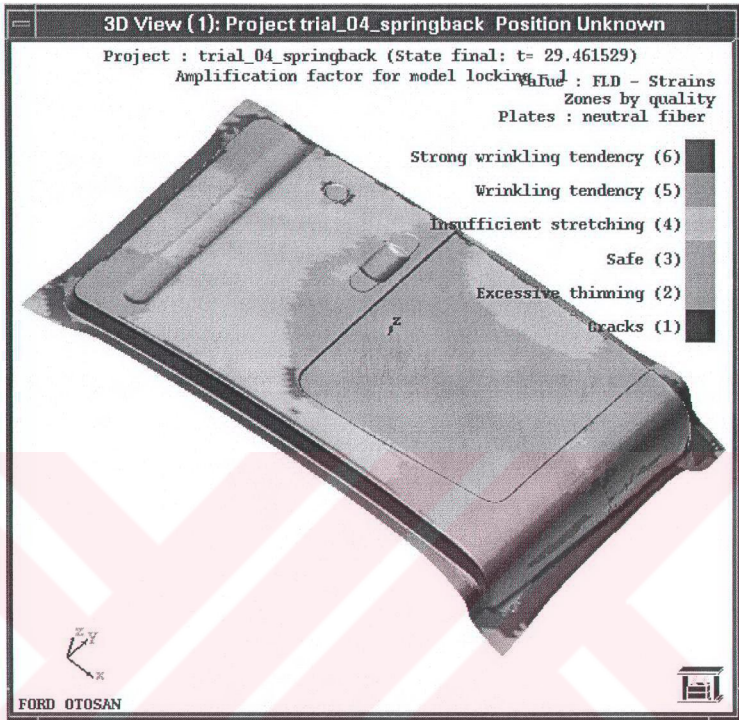
Sac sınırları geometri üzerindeki 4 noktadan, 3 boyutlu düzlemsel bir eğriden yada hazır bir eleman ağından oluşturulabilir. Süzdürme çubuğu modellenirken hem yatay kuvvet yani saca teğet ve dikey kuvvet yani saca dik kuvvetler hesaba isteğe göre katılabilmektedir.

Yapılan simülasyon sonucunda kullanıcıya şunlar sunulmaktadır; kalınlık, animasyon, uzamalar, gerilmeler, form alma diyagramı, yer değiştirmeler, izler, kesitler.

3.3.2 Arka Kapı Dış Panelinin Dinamik Açık Yöntemle Simülasyonu

Arka Kapı Dış Panelin simülasyonu kapalı yöntemle, yani AutoForm'da yapıldığı gibi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.23). Simülasyonların aynı parametrelerle yapılmış olması zaten sonuçta yapmayı planladığımız karşılaştırma için gereklidir. Bu nedenle ham sac ebadı, pot çemberi basıncı, süzdürme çubuğu yerleri, ve geometri aynıdır. Bu noktada hemen belirtmek gerekir ki AutoForm ve OPTRIS arasındaki bazı parametrelerin birbiriyle uyumluluğu kesin olarak sağlanamamıştır. Bunlar her iki yazılımın kendi iç yapısında olan kabullerdir. Sözgelimi yağlama katsayısı her iki programda da mevcuttur ama aynı değerlerin aynı anlama gelip gelmediği uzun bir araştırma gerektirmektedir. Yine süzdürme çubukları şiddetleri için de aynı şey geçerlidir. Yapılan bazı simülasyonlardan ve kullanıcı birikimlerinden asgari bir uyumluluk yakalanmıştır ve bunun çalışmamız için yeterli olduğu kanaatindeyiz. Diğer yandan eğer istenirse pek çok panel üzerinde hem deneysel hem de teorik çalışma yapılarak kesin sonuç alınabilir. Ancak belirtildiği gibi mevcut seviyedeki uyumluluk bu çalışma için yeterlidir.

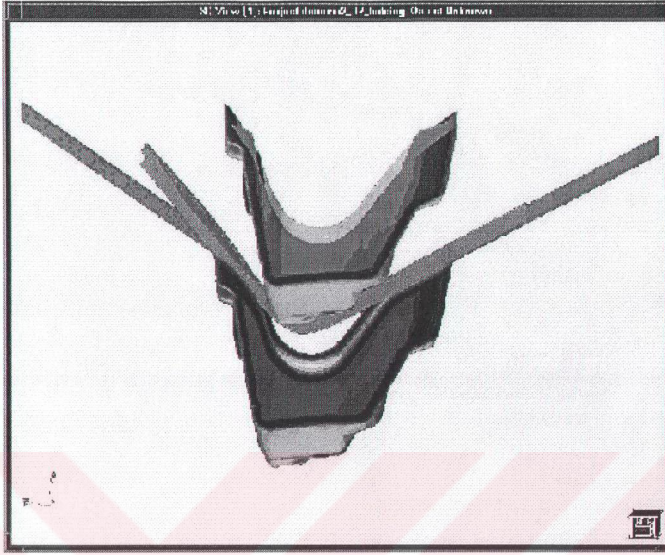
Çekme aşamasını simülasyonu 22 saat sürerken, geri yaylanma analizi 144 saat sürmüştür. Dörtgen yani 4 düğüm noktalı, eleman kullanan OPTRIS bu panel için 124 316 eleman kullanmıştır. Orta bölgelerde minimum kalınlık 0.6 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.23: Arka kapı dış panelin OPTRIS'teki çekme simülasyonu form diyagramı

3.3.3 Ön Göğüs Panelinin Dinamik Açık Yöntemle Simülasyonu

Ön Göğüs Paneli de yine Arka Kapı Dış Paneli gibi hemen tüm parametreleri aynı olacak şekilde simülasyona sokulmuştur (Şekil 3.24).

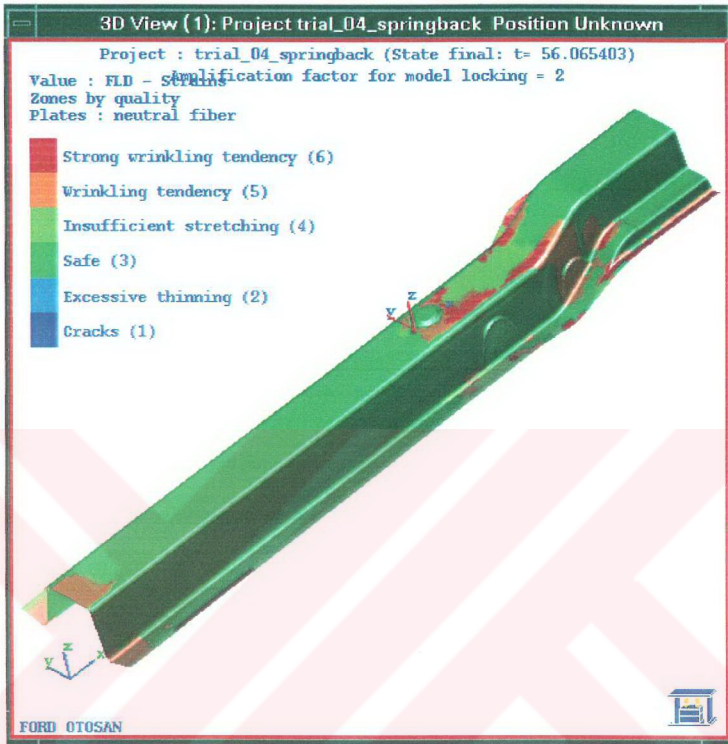


Şekil 3.24: Ön göğüs panelinin OPTRIS'teki çekme simülasyonu

Parça diğer parçalara göre daha çok yüzey formu içermektedir. Bu nedenle daha çok ağ elemanla ifade edilmesi gerekmekte, dolayısıyla daha uzun hesaplama süreleri ortaya çıkmaktadır. Bu panel OPTRIS'te yaklaşık olarak 30 saat sürmüştür.

3.3.4 Arka Şasi Kolu Panelinin Dinamik Açık Yöntemle Simülasyonu

Arka Şasi Kolu Paneli özellikle karakteristik biçimiyle bizi, geri yaylanma hesaplamalarında ve geri yaylanma telafilerinde bir hayli ilgilendirmektedir. Bir sonraki bölümde görüleceği gibi OPTRIS geri yaylanma hesaplamalarında bu panel üzerinde başarılı sayılacak sonuçlar çıkarmıştır. Ayrıca çekme simülasyonu açısından da gerçeğe yakın neticeler alınmıştır (Şekil 3.25).



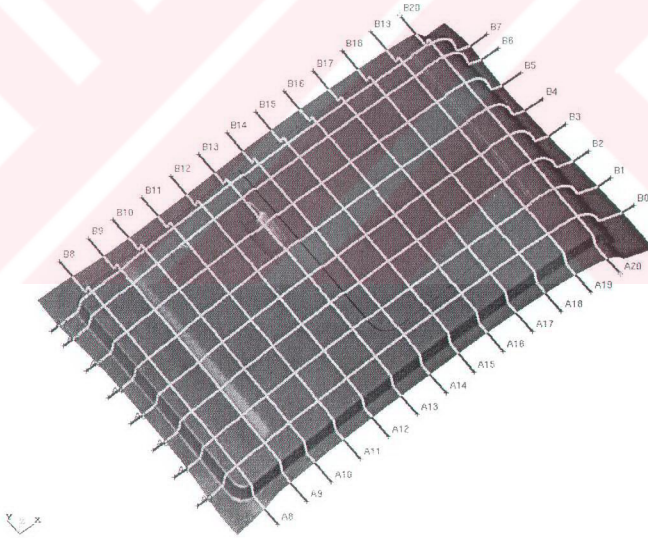
Şekil 3.25: Arka şasi kolu panelinin OPTRIS'teki çekme simülasyonu form diagramı

Çekme simülasyonu hesaplaması 36 saat sürerken, geri yaylanma ise 63 saat sürmüştür. 154 341 dörtgen eleman kullanılmıştır.

BÖLÜM 4

SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde AutoForm ve OPTRIS yardımıyla elde edilen teorik hesaplama sonuçlarının yorumlanması ve mümkün olduğunca aynı şartlarda basılmış gerçek panelden alınan değerlerin kıyaslanması yapılacaktır. Bu amaçla hem bilgisayardaki simülasyon paneli üzerinden hem de gerçek panel üzerinden düzlem kesitler alınacaktır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Çekilmiş sacın üzerinde kesitlerin dağılımı

Gerçek panel mümkün olduğunca çekme kalıbından çıktığı formda ölçülmeye çalışılmıştır. Bunu sağlamaya yönelik en pratik yol olarak panelin erkek kalıp üzerine bastırılmadan yerleştirilmesi düşünüldü. Ölçme aracı olarak noktasal ölçüm yapan bilgisayar destekli ölçme tezgahı kullanılmıştır.

Takip eden paragraflarda incelenecek olan panellere ait kesitler genelde en kötü sonuçların alındığı kesitlerden ya da en karakteristik olan kesitlerden seçilmiştir.

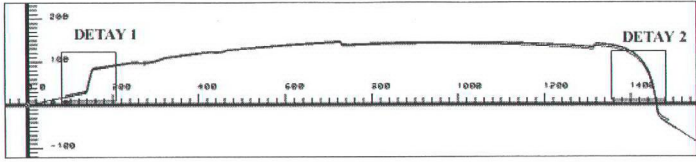
4.1 Arka Kapı Dış Panel

Söz konusu panele ait kesitler, panelin boyunda numaraları A0-B0'dan A7-B7'e 8 adet, eninde A8-B8'den A20-B20'ye 13 adet olarak seçilmiştir (Şekil 4.1). Önce simülasyon programında belirlenen kesitler, daha sonra ölçme tezgahına bildirilmiş, ve eğriliğin arttığı bölgelerde örnekleme nokta sayısını sıklaştıracak şekilde bir ölçüm yapılması sağlanmıştır. Ölçme tezgahından gelen bu kesitler Excel programı yardımıyla düzenlenerek bir yüzey tasarım programı olan ICEM Surf ve kapsamlı bir yazılım olan PDGS programında kıyaslanmıştır. Şimdi sırasıyla bu kesitlerden en karakteristiklerindeki durumlar incelenecektir.

4.1.1 Kesitler

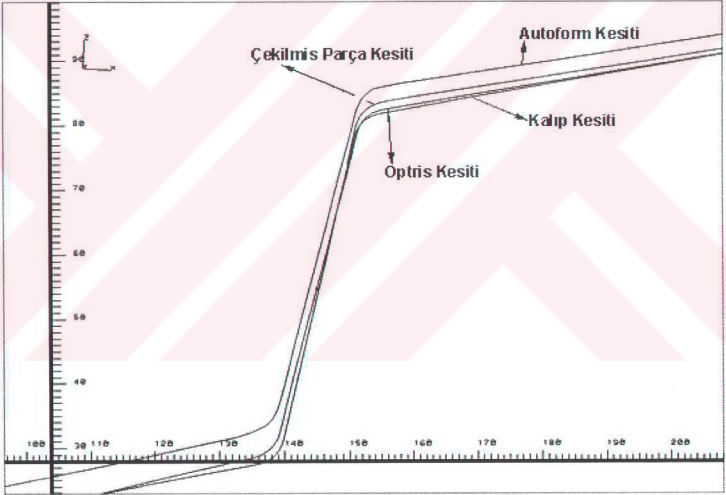
Kesit A6-B6

Boylamasına olan bu kesitteki değişimleri daha iyi inceleyebilmek için iki adet detay penceresi belirlenmiş ve bu detaylardaki değişimler gözlenmiştir (Şekil 4.2). Kesitler ait olduğu bilgiye göre etiketlenmişlerdir. Çekme kalıbından çıkmış ve geri yaylanmış gerçek panelden ölçülmüş kesit “çekilmiş parça kesiti”, kalıp geometrisi yani tasarlanmış olan panelin kesiti “kalıp kesiti”, AutoForm’un hesapladığı geri yaylanmış parça kesiti “AutoForm Kesiti” ve OPTRIS’in hesapladığı geri yaylanmış parça kesiti “OPTRIS Kesiti” olarak işaretlenmiştir. Ayrıca gösterimlerde boyutun anlaşılabilmesi için milimetrik bir ölçü skalası eklenmiştir.



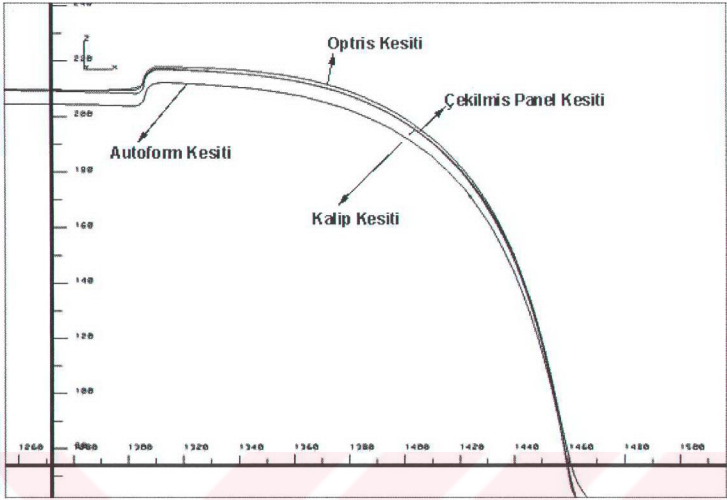
Şekil 4.2: Kesit A6-B6

Detay 1 Şekil 4.3'te, gösterilmektedir. Detay 1'de görüldüğü gibi AutoForm hesaplaması gerçek panel ile yön olarak aynı olmakla birlikte miktar olarak farklıdır. Hata kesme hattı içindeki bölgede 2.6 mm'dir. OPTRIS kesiti ise gerçek panele daha yakın ve geri yaylanma yönü olarak doğrudur. OPTRIS için hata, kesme hattı içindeki bölgede 1,2 mm'dir.



Şekil 4.3: Şekil 4.2'de gösterilen detay 1

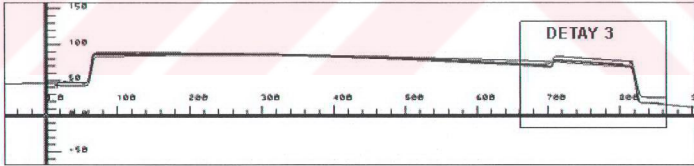
Şekil 4.4'teki detay 2'de ise çekilmiş panel ile kalıp kesiti neredeyse birbirinin üzerine çıkmıştır. Bu durumda geri yaylanma yönü net değildir. O nedenle analiz programlarının şiddetlerine bakılırsa, AutoForm'un 5 mm OPTRIS'in 1.3 mm hata ile geri yaylanmayı hesapladığını görürüz.



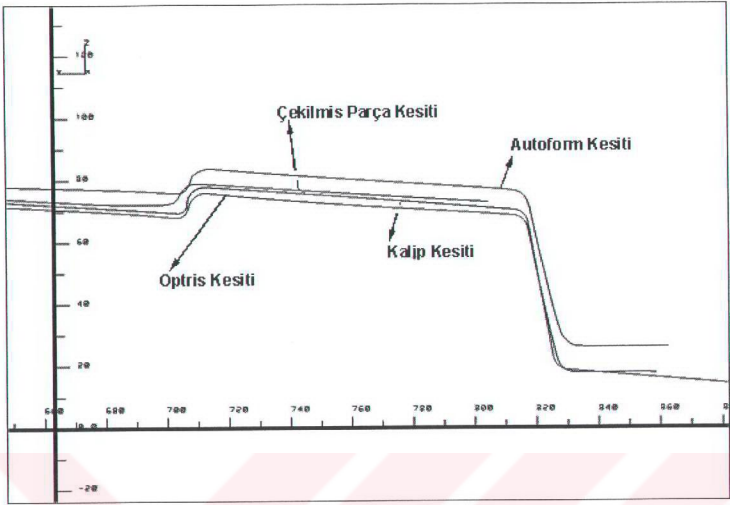
Şekil 4.4: Şekil 4.2'de gösterilen detay 2

Kesit A15-B15

Şekil 4.5'te A15-B15 kesiti gösterilmiştir. Bu kesitten alınmış olan Detay 3 ise Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.5: A15-B15 kesiti



Şekil 4.6: Şekil 4.5'de gösterilen detay 3

Detay 3'te AutoForm gerçek panelden maksimum 4.7 mm yukarıda kalırken OPRIS 4.2 mm aşağıda kalmıştır. Bu durumda OPRIS yön olarak hatalıdır.

Panel üzerinde oluşan burulma nedeniyle tam anlamıyla sağlıklı bir ölçme yapılamamıştır. Buna rağmen geri yaylanma hesaplamasında, AutoForm bazı bölgelerde OPRIS'ten daha iyi sonuçlar elde etmişse de panelin genelinde OPRIS geri yaylanmayı daha iyi tahmin etmiştir.

4.2 Ön Göğüs İç Paneli

Ön Göğüs Paneli büyük ölçüde simetrik bir parçadır. Bu nedenle gerçekte panelin tümü incelendiği halde, simetri özelliğinin parça üzerindeki sonuçlar açısından da geçerli olduğu görüldüğünden burada sadece bir yarısına ait kesitler incelenecektir. Bu anlamda 7 adet kısa eksende ve bir adet de uzun eksende kesit alınmıştır (Şekil 4.7).



Process step: drawing, Process time: 1000.000

Dec 12 17:53:51 2001

V18A344-DERINPOT-FEA17-SIM1 (icem2, 29 May 2001)



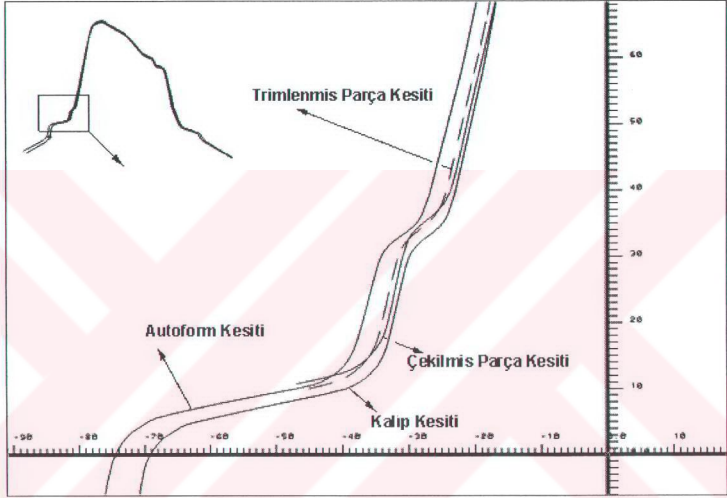
Şekil 4.7: Ön göğüs paneli kesitleri

Bu panel üzerinde yapılan ölçümler neticesinde genel olarak beklenenin altında bir geri yaylanma oluşmuştur. Bunun nedeni, panelin araç üzerinde pek çok gösterge ve kumandanın bağlantı hattı üzerinde olması nedeniyle pek çok küçük form içermesidir. Çekme sonucu arta kalan elastik enerjiler karmaşık bir dağılım göstererek bir birine karşı çalışmış, böylece geri yaylanma miktarını düşürmüş, ve panelin geometrik kararlılığını artırmıştır. İmalat açısından sorun olmayacak boyutta bir geri yaylanma görülmesini takiben yüksek hesaplama zamanları söz konusu olduğundan OPRIS geri yaylanma hesaplaması yapılmamıştır. Ancak paneldeki geri yaylanmanın kenardaki A7-B7 kesitine yakın geçen kesme hattının kesilmesinden sonra nasıl değiştiği sorgulanmış ve ölçülerek kesitlere konmuştur.

4.2.1 Kesitler

Kesit A0-B0

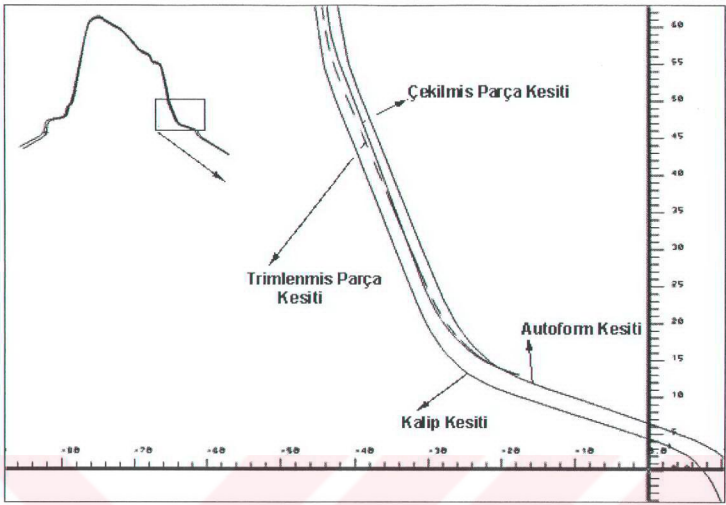
Panelin tam ortasında, yani simetri düzleminde bulunan bu kesit Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bu kesitte AutoForm 4.5 mm’lik bir geri yaylanma hesaplarken panel üzerinde 1 mm kadar oluşmuştur. Kesme den sonra ise bu değer 2 mm’ye kadar yükselmiştir. Bunun nedeni iki uçta bulunan malzemenin paneli bir kuşak gibi tutması olabilir. Zaten trim operasyonlarından sonra paneller üzerinde yeni deformasyonlar oluşması sac kalıpcılığında beklenen bir olaydır.



Şekil 4.8: A0-B0 kesiti

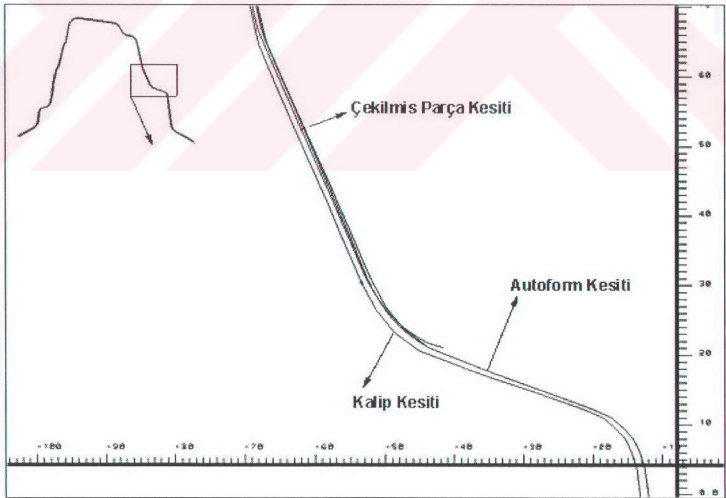
Kesitlerin birbirlerine göre dik ekseninde az da olsa kayık olmasının nedeni ise uzun ekseninde, yani A8-B8 kesitinde oluşan geri yaylanma ve ölçme şartlarının değişkenliğidir. Özellikle çevre kesildikten sonra en çok orta bölgede 2 mm ve en az uçlarda 0.5 mm’lik değerlerde geri yaylanma oluşmuştur.

Şekil 4.9’da ise yine aynı kesite ait başka bir detay verilmiştir. Burada geri yaylanma panelde 1.8 mm olurken, AutoForm 3.6 mm’lik bir değer hesaplamıştır. Çevre kesme işleminden sonra fazla bir değişim oluşmamıştır.



Şekil 4.9: A0-B0 kesiti

Kesit A6-B6



Şekil 4.10: A6-B6 kesiti

Panelin uçlarına doğru geri yaylanma miktarları azalmaktadır. Bunu Şekil 4.10'da gösterilen A6-B6 kesitinde görebiliriz. AutoForm 1.4 mm'lik bir geri yaylanma hesaplarken gerçekte 1 mm olmuştur. Trim operasyonundan sonra panelin bu kesitinde 0.5 mm'nin altında bir değişim oluşmuştur.

4.3 Arka Şasi Kolu Paneli

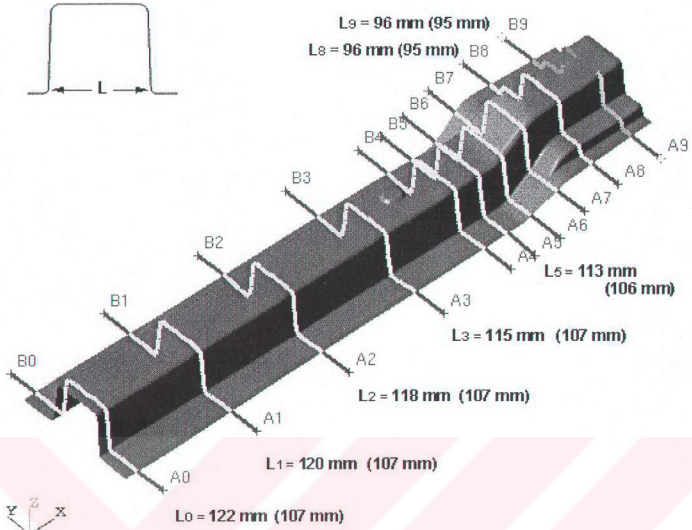
Arka Şasi Kolu Paneli, Ön Göğüs Paneli gibi simetrik bir panel olmamasına rağmen sağ ve sol olmak üzere iki adeti aynı anda çekildiği için, çekme kalıbı simetrik olmaktadır. Bu durumun gerçek panel üzerindeki sonuçlarda da tespit edilmesi nedeniyle, bu bölümde kesitler incelenirken sadece yarısı ele alınacaktır.

Arka Şasi Kolu Paneli şapka kesiti yapısıyla literatürdeki geri yaylanma çalışmalarında kullanılan örnek parçalara çok benzemektedir. Zaten en belirgin geri yaylanma bu parça üzerinde oluşmuştur.

4.3.1 Kesitler

Enine kesitte toplam 9 kesit alınarak Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Panel üzerinde yapılan ölçümlerde yz kesitleri için, paneldeki geri yaylanma miktarlarının açık olan uca yaklaştıkça arttığı tespit edildi. Zx düzlemindeki orta kesitte ise panelin uzun ekseninde de bir miktar geri yaylandığı tespit edildi. Ancak bu panel ortadan ikiye bölünerek iki ayrı parça elde edileceği için, bu geri yaylanma hem miktar hem de fonksiyon olarak çok önemli değildir. Ayrıca burada dikkate almayacağımız bir diğer nokta ise panel uzun ekseninde boyunca oluşmuş olan az miktarda burulmadır.

Şekil 4.11'de çekilmiş parçanın yan duvarlarının kenarından ölçülen açıklıkları ve bu açıklığın kalıptaki ölçüsü parantez içinde verilmiştir.



Process step: springback, Process time: 400.000
 V10126-7-A-sim38

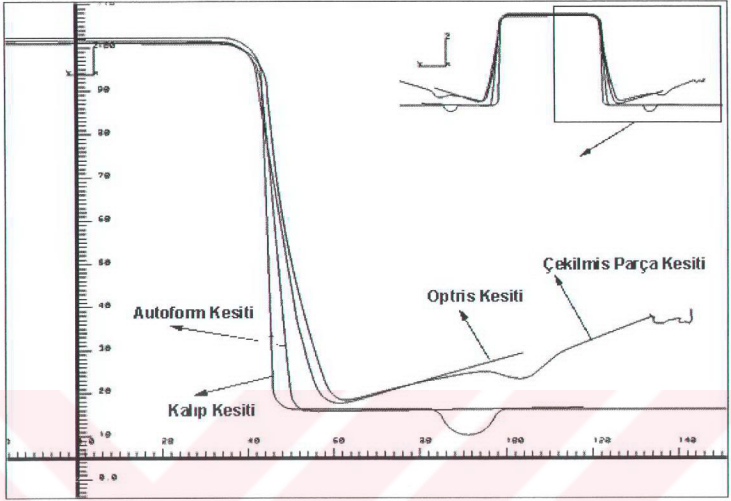
Dec 15 15:33:30 2001



Şekil 4.11: Çekilmiş parçaya ait kesitler ve kesitlerdeki açıklıkların parantez içinde verilen kalıptaki ölçüyle karşılaştırmaları

Kesit A0-B0

Bu kesit çekilmiş parçanın açık ucuna en yakın olandır. Kesitte görüldüğü gibi OPTRIS çekilmiş panel kesitinden 2 mm'lik farklı yani bir hayli yakın bir hesaplama sonucu bulmuştur. Aynı kesitte Autform ise 6 mm hatalı bir hesaplama yapmıştır. Bu noktada belirtmek gerekir ki her iki yazılımın hesaplamaları arasındaki tek fark geri yaylanma şiddetleri değildir. OPTRIS aynı zamanda profilin şeklini de Autofom'a göre gerçeğe daha yakın hesaplamıştır. Özellikle duvar dibine doğru geri yaylanma sonrası oluşan parabolik hatta bu durum daha belirgindir.

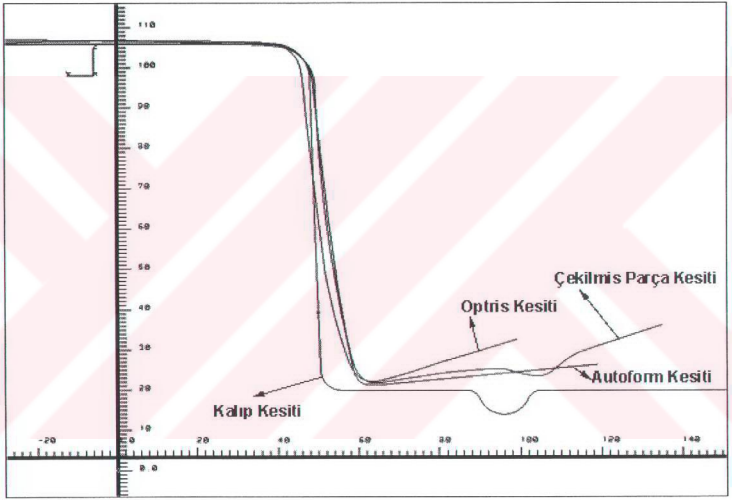


Şekil 4.12: A0-B0 kesiti

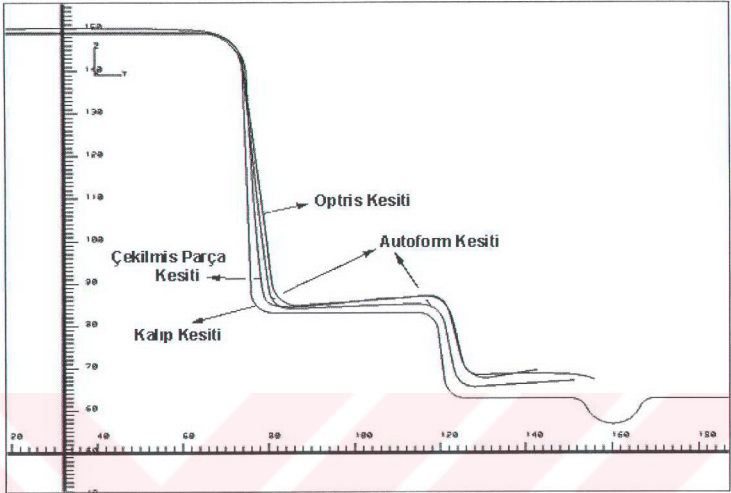
Bu arada kalıp kesitinde görülen süzdürme çubuğu izi çekilmiş panel üzerinde de görülmektedir. Aynı formda olmamalarının nedeni sadece geri yaylanma değildir. Süzdürme çubukları standart olarak imal edildikten sonra kalıp ekiplerinin belirleyecekleri ihtiyaçlara göre değiştirilmektedir. En sık kullanılan yöntem yüksekliğinin düşürülmesidir. Bu nedenle bu tür bir farklılık oluşmuştur. Bu kesitte sacın daha fazla akması için, süzdürme çubuğu yüksekliği düşürülerek değiştirilmiştir.

Kesit A3-B3

Şekil 4.13'te A3-B3 kesitini görmekteyiz. Bu kesitte OPTRIS duvar açılmasında gerçekçi bir tahmin yaparken flanş açısında bir miktar hatalı sonuç bulmuştur. AutoForm ise bir önceki, yani açık olan uca yakın kesite oranla daha fazla geri yaylanma hesaplamış ve gerçek panelden daha az geri yaylanma hesaplamasına rağmen, bir önceki kesite göre daha yakın bir sonuç bulmuştur. Yani AutoForm hesaplamasına göre parçada simetri düzlemine yaklaştıkça geri yaylanma artmaktadır. Oysa daha önce değinildiği ve Şekil 4.11'de gösterildiği gibi geri yaylanmanın panel üzerindeki dağılımı bunun tersidir.



Şekil 4.13: A3-B3 kesiti



Şekil 4.14: A8-B8 kesiti

A8-B8 kesiti Şekil 4.14'te verilmiştir. Bu kesitte parça derinliği azaldığından ve çekme derinliği iyi bir çekme için sabit tutulmaya çalışıldığı için trim hattından sonra bir basamak eklenmiştir. Bu da sacın o bölgede, sacın açık ucundaki kesitlerine göre iki kenar fazla bükülmesine neden olmaktadır. Bunun geri yaylanmayı azaltmaya yönelik yararından ön göğüs paneli simülasyonlarında bahsedilmiştir.

AutoForm bu kesitte duvar bölgesinde 1.4 mm'lik bir hatayla hesaplama yapmıştır. Ancak flanştaki geri yaylanma miktarı AutoForm'un hesapladığından daha fazla oluşmuştur. OPTRIS bunu doğru hesaplarken duvarda 2 mm gibi bir hata yapmıştır.

Böylece gerçek panellerden seçilmiş olan örnekler üzerinde simülasyon programlarının performansını ve sacın davranışlarını incelemiş olduk. Elbette daha çok örnekleme yapılarak daha kesin sonuçlara ulaşmak mümkündür. Ancak kanaatimizce ve genel düşünceye göre de OPTRIS yazılımı geri yaylanma hesaplamasında AutoForm'a göre daha başarılıdır.

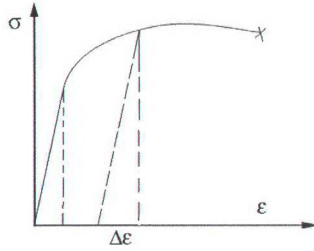
BÖLÜM 5

GERİ YAYLANMA TELAFİSİNDE YÖNTEM

Bu bölümde çeşitli yazılımlarla gerçeğe olabildiğince yakın hesaplanmış geri yaylanma değerlerinin, tasarlanmakta olan kalıp geometrisine yansıtılmasına değinilecektir. Açılan bir flanşın veya düzleşen bir kamburluğun hesaplanabilmiş olması çok olumludur. Ancak esas olan bu hareketin oluşmasını engellemektir. Bunu yapmak için daha önce de değinilmiş olan çekme işlemi parametrelerini en kolaydan zora doğru ayarlamak gerekir. Ancak çoğunlukla bu ayarlamalar faydalı olsa da sorunu tam olarak çözmez. Bu noktada kaydedilen gelişmeler ışığında azaltılan geri yaylanma etkisinin panelin konumu ve fonksiyonları açısından kabul edilip edilemeyeceğine bakılır. Çoğu dış panelde ve geri yaylanmanın fazla olduğu iç panellerde özellikle bir montaj gurubunun parçalarında geri yaylanmayı kabul edilebilir sınırlara çekmek için kalıp geometrisi değişimi yoluna gidilir.

5.1 Geliştirilen Yöntemin Temelleri

Ticari yazılımlar yardımıyla hesapladığımız geri yaylanma ve kalıp geometri bilgisi elimizdeki temel unsurlardır. Geri yaylanma, kalıp unsurlarının sac üzerinde oluşturduğu gerilmeler kalktıktan sonra, malzemenin elastik özelliklerinden dolayı parça geometrisinde meydana gelen büyük oranda elastik, ve ender olarak elastik-plastik değişim olarak tanımlanmaktadır [2-4]. Bu duruma örnek olarak sünek bir metalin akma diyagramında yükleme kaldırıldıktan sonra malzemenin uzama miktarındaki düşüş gösterilebilir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Sünek bir metaldeki geri yaylanmanın akma diyagramı üzerinde gösterilişi

Geri yaylanma daha farklı bir ifadeyle, form almış sacın gerilme indüklenmiş halden serbest hale geçişi sırasında ters kuvvetler nedeniyle fazladan oluşan geometri değişimi olarak tarif edilebilir. Bu geometri değişiminin yapısına göre “duvar veya flanş’ta doğrusal açılma” ve/veya “duvar veya flanş’ta eğrisel açılma” şeklinde gerçekleşir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Çeşitli geri yaylanma şekilleri (a) Doğrusal açılma bölgesel bükmelerde görülürken (b) eğrisel açılma genellikle çekme ve bükmenin birlikte olduğu durumlarda görülür.

Geri yaylanmanın sayısal olarak ifade edilmesinde en çok kullanılan büyüklük “eğrilikteki değişim”dir. Eğriliğin tanımı:

$$\frac{1}{R} \quad (5.1)$$

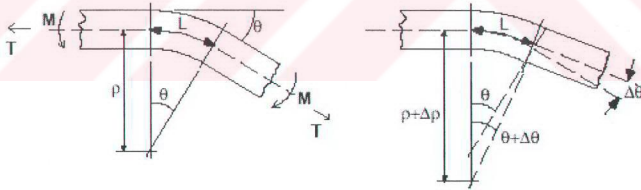
şeklindedir. Paydadaki R, eğriliğin ölçüldüğü noktadaki geometriyi ifade edebilecek bir yay parçasının yarıçapını gösterir.

Geri yaylanma hesaplamaları, saca uygulanmasıyla geometriyi bulunduğu duruma getiren kuvvet ve/veya momentin kaldırılması ilkesine dayanır. Geri yaylanma nicelik olarak pek çok biçimde ifade edilebilir. Bunlardan biri bükülme yarıçapının büyümesi veya başka bir ifadeyle eğriliğin azalmasıdır. Düzlemsel uzama koşulları (plane strain) altında genellikle:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} = \frac{M(1-\nu^2)}{IE} \quad (5.2)$$

olarak ifade edilir. Burada R, sac gerilme altındayken oluşan içteki yay parçasının yarıçapını, R' gerilmeler kalktıktan sonraki yarıçapı, M bükme momentini, ν Poisson oranını, I sacın atalet momentini ve E malzemenin Young modülünü göstermektedir..

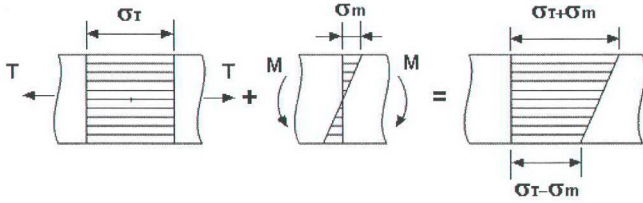
Bu çalışmanın yoğunlaştığı çekme kalıplarında sac üzerinde bükme momentine ilaveten çekme kuvveti de bulunmaktadır. Geri yaylanmanın bu şekilde from verilmiş bir sac kesiti üzerinde gösterilmesi Şekil 5.3'de verilmiştir. Burada ρ sac kesitindeki tarafsız eksenin eğrilik yarıçapını ifade etmektedir.



Şekil 5.3: Bükülen bir sac kesiti üzerinde geri yaylanmanın gösterimi (a) L boyundaki bir sac kesitinin M momenti T çekme kuvveti etkisinde bükülmesi, (b) aynı kesitin yükleme kalktıktan sonraki hali

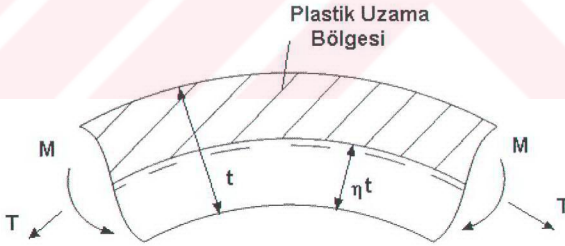
Çekme operasyonunun ilk aşamasında çekme kuvveti, momente göre ihmal edilebilecek seviyededir. Ancak erkek kalıbın ilerlemesiyle kesit üzerindeki çekme

kuvveti artar ve momentin yarattığı gerilmeye ilaveten çekme gerilmesi oluşur. Bu durumdaki sac üzerindeki gerilme dağılımı Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4: Bükme ve çekme etkisindeki bir sac kesitindeki gerilme dağılımının bileşenleri

Malzemenin elastik sınır aşıldıktan sonra yani bükme yarıçapının maksimum olduğu dıştaki liflerdeki gerilme akma gerilmesini aştığında, öncelikle sacın dış yüzeyinden içe doğru plastik deformasyonlar başlar (Şekil.5.5). Plastik deformasyon bölgesi sac kalınlığı t 'nin belli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu bölge η oransal çarpanla $t(1-\eta)$ olarak ifade edilebilir.



Şekil 5.5: Bükme ve çekme etkisindeki bir sac kesitindeki plastik uzama bölgesinin dış yüzeyden iç yüzeye doğru $(1-\eta)t$ derinliğinde dağılımı

Sacın geldiği bu durumdan sonra üzerindeki yüklemelerin kalkması sonucunda eğrilik yarıçapındaki değişim ampirik olarak şu şekilde ifade edilebilir [2]:

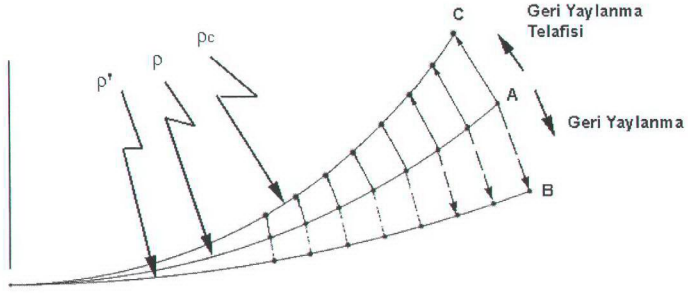
$$\Delta(1/\rho) = \Delta M / (E' t^3 / 12) \quad (5.3)$$

Bu ifadedeki E'

$$E' = E / (1 - \mu^2) \quad (5.4)$$

olarak ifade edilir. E, young modülü ve μ , Poisson oranıdır.

Bu denklemlerin ışığında geri yaylanmanın sacın üzerindeki gerilmelere, malzeme özelliklerine, ve kalınlığına bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Geri yaylanma miktarının hesaplanmasında kesit üzerinde oluşmuş olan momentin gerekli olduğu açıktır. Sacın eğrisi üzerindeki değişim olarak ifade edilen geri yaylanma pek çok form içeren bir sac panelde bazı bölgelerde öteleme, bazı bölgelerde belli bir mesnet noktası etrafında dönme hareketlerine yol açar. İki boyutlu kesit üzerinde bu harekete bakılırsa tarafsız eksen etrafında bir dönme ve açılma oluştuğu görülür (Şekil 5.6). Farklı formlardaki panellerde aynı mekanizma farklı şiddetlerle çalışır. Bu form değişikliğini tamamen engellemek mümkün olmadığına göre, yapılacak en makul şey bu değişimin sağlıklı ve doğru tahminini hesaba katarak bir kural dahilinde kalıp geometrisini değiştirmektir [3-4,12]. Örneğin Şekil 5.6'deki geri yaylanma eğrilik yarıçapında değişimle ifade edilebilir. Çekilen geometrinin eğrilik yarıçapı ρ , geri yaylanmış geometrinin eğrilik yarı çapı ρ' ile ifade edilir. Eğrilik yarı çapı geri yaylanmayla artmaktadır. Bu artma miktarı kadar çekme kalıbı geometrisinin eğrilik çapında bir azaltma yapılırsa telafi içeren geometrinin eğrilik yarıçapını ifade eden ρ_c , elde edilir. Böylece bu üç büyüklüğün arasında $\rho' > \rho > \rho_c$ şeklinde bir bağıntı oluşur. Burada ifade edilen yöntem en basit geri yaylanma telafisi oluşturma işlemidir.

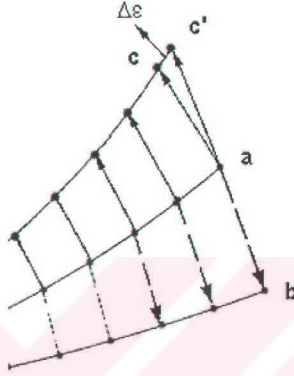


Şekil 5.6: Geri yaylanmanın A kesitinde çekilmiş bir sac üzerinde B kesiti formunda oluşması sırasında eğrilik yarı çapındaki değişimin geri yaylanma telafisi içeren C kesitinde bir geometri elde edilmesinde kullanılması

Geri yaylanma sırasında malzemede geometriye göre oluşması mümkün olan plastik değişimlerin şekildeki kesitte A ve B geometrisindeki kesit boylarının değişmesini etkilemeyecek kadar düşük olduğu kabul edilebilir. Bu durumda geri yaylanma telafisini içeren C geometrisinin de kesit boyunun aynı olması gerektiği sonucu çıkar.

Bu bölümde aktarılacak olan yöntem eğrilik yarıçapında bir değişimle ifade edilen geri yaylanma telafisi işlemini düğüm noktaları bazında yapmayı hedeflemektedir. Bunun için önerilecek yöntem, düğüm noktasının geri yaylanma sırasında aldığı yolu hesaplayıp aynı şiddette fakat ters yönde bir geometriye uygulamaktır. Yolun bu tür küçük değişimlerde en doğru ifadesi bir yay parçasıdır [12]. Şekil 5.6'da kesit üzerindeki düğüm noktalarının hareketi Şekil 5.7'de daha detaylı gösterilmiştir. Eğer geri yaylanmadan önceki, geri yaylanmış ve telafi için geliştirilmiş olan geometrilere ait aynı düğüm noktasının hareketi ele alınırsa, hareketsiz nokta etrafında dairesel bir hareket yapmakta olduğu, ve geri yaylanma telafisi geometrisindeki noktanın c noktası olacağı söylenebilir. Ancak dairesel hesaplama çok zordur bu nedenle çok daha basit olan doğrusal bir hesaplama önerilmektedir. Bu üç nokta doğrusal olarak birleştirdiğinde ise dairesel hattan $\Delta\epsilon$ saparak c' noktasına düşen bir geri yaylanma telafisi geometrisine ait bir düğüm noktası elde edilir. Bu sapma miktarı eğrilik yarıçapı büyüdükçe eğriselliğin azalması nedeniyle azalacaktır. Ayrıca küçük yer

değiştirmeler için yay uzunluğu ile doğrusal yay krişi arasındaki fark azdır. Bu durumda doğrusal değişimin, eğriselliğin küçük olduğu yerlerde küçük miktarlarla hesaplama hatası yaptığı kabul edilerek, geri yaylanma telafisi içeren geometri kolayca hesaplanabilir.



Şekil 5.7: Çekme geri yaylanma ve telafî geometrilerinde aynı düğüm noktasının konumları

Ancak telafî verilmiş olan formun aynı miktarda geri yaylanmaya yol açması mümkün olmayabilir. Bu durumda birkaç iterasyon yapılması gerekir. Böylece hedeflenen hata miktarına veya onun altında bir değere erişmek için yapılacak iterasyonlar neticesinde en uygun kalıp geometrisi elde edilerek panel imal edilir. Bu işlemi yaparken elimizde BDT (Bilgisayar Destekli Tasarım) oluşturan Bezier yada NURBS yüzeylerinin birbirleriyle ilişkilerini koruyarak değiştirmek çok zordur. Bu yüzden sonlu elemanlar programlarının kullandığı düğüm noktaları ve elemanlardan oluşan ağ yapısını değiştirmek daha kolaydır. İterasyonlar sonucunda istenen değeri elde edildikten sonra, son ağ yapısına göre yüzeyler değiştirilerek kalıp yüzeyleri elde edilir.

Bu noktada işleme tabi tutmayı düşündüğümüz çekilmiş sac panel geometrisi bazı sorunlu bölgeler içerişor olabilir. Bunlar çekmenin sağlıklı yapılamamış olması nedeniyle geometride yırtılma ve kırılmalardan bulunmasıdır. Bu bozulmuş ağ yapısı

üzerinde işlem yapmak bize anlamlı sonuçlar vermez. Bu durumda panelin sağlıklı olarak çekilmiş olmasını, önerdiğimiz yöntem için bir ön şart olarak tanımlayabiliriz. Kaldı ki bu zaten mantıklıdır, çünkü üzerinde kırışma ve yırtılmalar bulunan bir panel için geri yaylanmaların giderilmesi henüz başlanmaması gereken bir aşamadır.

AutoForm programı ağ yapısının üçgen elemanlarla ifade eder, ve öncelikle düğüm noktalarını numaralandırdıktan sonra bu notasyona göre üçgen elemanı ifade eden üçlü guruplar halinde listeler.

Buna göre geri yaylanma sırasında düğüm noktası sayısında bir değişim olmadığı tespit edilirse, eşit sayıda düğüm noktasından oluşan iki tablonun ifade ettiği değişim basit bir aritmetik işlemle ifade edilebilir. Bu durum bazı panellerin simülasyonlarında gözlenmiş ve geri yaylanma hesaplamaları sırasında düğüm noktasının aynı kaldığı görülmüştür. O halde şimdi yöntemin matematiksel ifadesini oluşturalım.

D matrisi (draw) çekme sonucunda elde edilen düğüm noktalarını ifade eden $n \times 3$ boyutunda bir matrisi ve a_{ij} düğüm noktalarının koordinatlarını ifade ettiği kabul edilirse;

$$D = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ X_i & Y_i & Z_i \end{bmatrix} \quad i = 1,2,3,\dots,n \quad j = 1,2,3 \quad (5.5)$$

şeklinde yazılabilir. Benzer şekilde geri yaylanmış geometri aynı biçimde ifade edilmek istenirse;

$$G = \begin{bmatrix} X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ X'_i & Y'_i & Z'_i \end{bmatrix} \quad i = 1,2,3,\dots,n \quad j = 1,2,3 \quad (5.6)$$

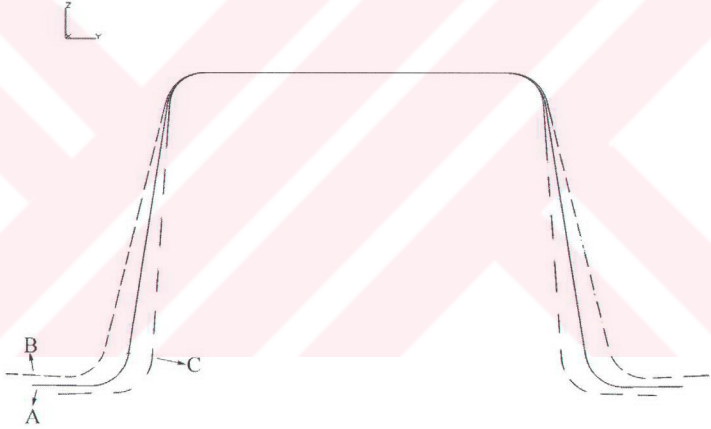
yazılabilir. Bu iki geometrinin arasında geri yaylanma miktarı kadar bir fark oluşmuştur ve bu farkı ifade eden bir F matrisi aynı mantıkla hesaplanabilir.

$$[F] = [G] - [D] \quad (5.7)$$

Bu arada bu farkı ilk ifade ettiğimiz D matrisinden çıkararak geri yaylanma telafisini içeren bir S sonuç matrisine ulaşmak mümkün olur.

$$[S] = [D] - [F] \quad (5.8)$$

Bu şekilde elde edilen geometri bize Şekil 5.8'deki gibi bir modifikasyonu gerçekleştirmemizi sağlar. Parça A kesitindeki gibi çekilmişken, B kesitindeki gibi bir geri yaylanma oluşmuştur. Ardından A kesitinden B kesitine oluşan değişim ve doğrultu ve şiddet olarak ters yönde A kesitine uygulanırsa geri yaylanma etkilerini telafi edecek bir C kesiti elde edilmiş olur.



Şekil 5.8: A kesitine sahip bir geometrinin B kesitine geri yaylanmasının ardından C kesiti şeklinde geri yaylanma telafisi içeren geometrinin gösterimi

Ancak geri yaylanmayı telafi edecek bilgi içeren bu yeni geometri çekme açısından önemli bir sakınca içeriyor olabilir. Bu sakınca ters açı (undercut) oluşma olasılığıdır. Yani pres eksenı yönünde bakıldığında kalıp üzerinde görülemeyen yani yukarıdaki bir noktanın altına gitmiş bir başka noktadır. Böyle bir geometri imal

edilemez. Bu nedenle C datasının yani geri yayınma telafisi içeren datanın bu anlamda kontrol edilmesi gerekir. Bunun için elimizdeki AutoForm dosyasına bir göz atalım. Bu dosya önce bütün düğüm noktalarının koordinatlarını sıralar ardından , üçgen elemanları bu düğüm noktaları yardımıyla tanımlar (Şekil 5.9).

```
#!f ascii
#-----#
#               Points               #
#-----#
Points
0 -53.7552 -37.2559 0.499905
1 -43.1064 -37.0045 0.499786
2 -44.4376 -36.7565 0.499333
3 -39.6127 -36.3402 1.34589
4 -37.5041 -34.7682 2.40846
5 -37.1728 -36.0605 2.17566
6 -35.8422 -35.9124 4.43016
7 -35.9379 -34.5884 4.36622
8 -34.32 -35.6374 6.49788
..
..
1119 2.55303 -9.95368 16.8016
1120 -30.773 -4.94522 22.2255
1121 2.80513 0.836847 17.0526
#-----#
#               Facets               #
#-----#
Facets
0 62 1 896
1 2 63 61
2 73 64 978
3 74 1029 4
4 13 1032 16
..
..
1914 9 1058 1056
1915 1058 12 13
1916 1056 13 11
```

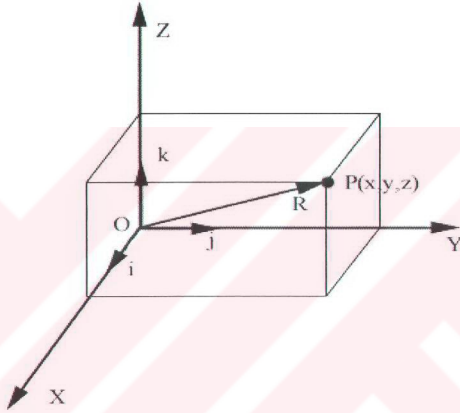
Şekil 5.9: AutoForm dosyasının içeriği: Üst bölümde düğüm noktalarının koordinatları ve alt bölümde bu noktaların birbirleriyle eleman oluşturmak üzere düzenlenmesi

Bu dosya oluşturulurken izlenen kurallar incelendiğinde, her eleman tanımlaması yapılırken düğüm noktalarının, tanımladıkları üçgen elemanın normal vektörü belirli bir yönde olacak şekilde sıralandıkları tespit edilir. Bunu daha iyi ifade edebilmek için biraz vektör matematiğine değinmek gerekmektedir [14].

Bir vektörün kartezyen koordinat sistemindeki ifadesi için Şekil 5.10'a bakılabilir. Şekildeki i, j, k , sırasıyla OX, OY, OZ yönünde birim vektörleri gösterirse, başlangıç noktası O olan bir R vektörü,

$$R = xi + yj + zk \quad (5.9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada x, y, z skalerleri R vektörünün i, j, k , karşılaştırma sistemine göre koordinatlarıdır. Bu vektör aynı zamanda koordinatları (x, y, z) olan uzayda bir P noktasını göstermektedir.

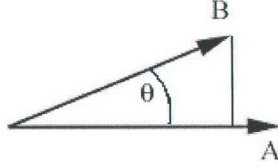


Şekil 5.10: Vektör

İki vektörün çarpımı vektörel ve skaler olmak üzere iki türdür. $A = a_1i + a_2j + a_3k$, ve $B = b_1i + b_2j + b_3k$ şeklinde iki vektöre, skaler çarpım

$$A \cdot B = |A| \cdot |B| \cdot \cos \theta \quad (5.10)$$

şeklinde tanımlanır. θ iki vektör arasında kalan açıdır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11: Vektör çarpımı

Skaler $A \cdot B = 0$ olabilmesi için A veya B vektörlerinden en az birinin 0 olması yada $A \perp B$ olması gerekir. Skaler çarpımın bir başka ifadesi de;

$$A \cdot B = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 \quad (5.11)$$

şeklindedir.

A ve B vektörlerinin vektörel çarpımı ise $C = A \times B$ ile gösterilen yeni bir vektör verir. Bu vektörün şiddeti $|C| = |A| \cdot |B| \sin \theta$ ile bulunur. C vektörü A ve B vektörlerinin oluşturduğu düzleme diktir ve sağ el kuralına göre bulunur. Yani A x B şeklinde yazılmış bir vektörel çarpım için sağ elin parmakları A dan B'ye doğru bir dönme hareketi yaparken başparmak C vektörünün yönünü göstermektedir. Vektörel çarpım determinant kullanılarak yapılabilir.

$$A \times B = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} \quad (5.12)$$

Uzayda düzlem denklemini ise

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (5.13)$$

şeklinde ifade edilir ve x, y, z koordinatlarının önündeki A, B, C katsayıları düzlemin normal vektörünün katsayılarıdır. Başka bir ifadeyle bir A (x_0, y_0, z_0) noktasından geçen, ve a,b,c katsayılarından oluşmuş, bilinen bir U vektörüne dik olan düzlemin denklemini ,dik vektörlerin skaler çarpımının 0 olması kuralı yardımıyla ve P vektörü

de düzlem üzerindeki herhangi bir noktaya uzanan $P(x, y, z)$ vektörünü ifade ediyorken,

$$(P-A).U=0 \quad (5.14)$$

denklemini yardımıyla ,

$$ax+by+cz = ax_0+by_0+cz_0 \quad (5.15)$$

formunda yazılır.

Bizim üçgen eleman yapımızdaki gibi A, B, C gibi üç vektörün ucundan geçen bir düzlemin denklemi ise;

$$((B-A) \times (C-A)).(P-A) = 0 \quad (5.16)$$

şeklinde , veya

$$\begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 & z-z_1 \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5.17)$$

determinant formunda ifade edilebilir. (x,y,z) , (x_1,y_1,z_1) , (x_2,y_2,z_2) , (x_3,y_3,z_3) sırasıyla P, A, B, C vektörlerinin uç koordinatlarını göstermektedir.

Satır sütun oranı 3x3 olan bir determinanın;

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} - a_{12} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} = \dots \quad (5.18)$$

$$\dots = a_{11} \cdot (a_{22} \cdot a_{33} - a_{32} \cdot a_{23}) - a_{12} \cdot (a_{21} \cdot a_{33} - a_{31} \cdot a_{23}) + a_{13} \cdot (a_{21} \cdot a_{32} - a_{31} \cdot a_{22})$$

şeklinde hesaplandığı bilinmektedir.

Bu denklemleri çıkarmaktaki amacımız üçgen elemanlardan oluşmuş olan geri yaylanma telafisi içeren C dosyasının imal edilmesi mümkün olmayan negatif açısının olup olmadığının kontrolünü yapabilmektir. Elimizdeki AutoForm dosyası

üçgen elemanlardan oluştuğuna göre , bu elemanlar birer düzlemi ve o düzlemlerde birer normal vektörünü ifade etmektedirler.

Bu durumda her eleman için düzlem tanımlaması yapılır ve $Ax+By+Cz+D=0$ formatındaki ifadede z koordinatının önündeki katsayı elde edilebilir. Bu katsayı aynı zamanda düzlem normal vektörünün z katsayısını ifade etmektedir. O halde bu katsayının işareti negatif olmadığı sürece düzlemimiz normali artı z yönündedir, yani ters açı oluşmamaktadır yargısına varabiliriz. Bu amaçla yukarıdaki 5.17 no'lu düzlem ifadesindeki determinant açılırsa z koordinatının katsayısı ve bu katsayının sıfırdan küçük olma durumu ,

$$(x_2 - x_1).(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1).(x_3 - x_1) < 0 \quad (5.19)$$

olarak elde edilir.

Şu halde geldiğimiz noktaya kadar olan bölümü toparlarsak, sonlu elemanlar yardımıyla hesaplanmış olan geri yaylanma bilgisi kalıp geometrisine ters yönde uygulanır, ve bu son geometrinin ters açiya sahip olup olmadığı kontrol edilir. Sonuç tekrar simülasyona tabi tutularak istenen geometrinin elde edilip edilmediği kontrol edilir. Kabul edilebilir hata sınırlarına kadar bir kaç iterasyon yapılabilir. Bu noktaya kadar olan aşamalardan, ağ yapısına geri yaylanmanın ters yönde uygulanması ve yeni oluşturulan ağ yapısında ters açı kontrolünün yapılması işlemlerini yoğun aritmetik hesaplama içerdiği için bir program yardımıyla yapmak uygun olacaktır. Bu amaçla “geri yaylanma ters çeviricisi” anlamında “springback inverter” kelimelerini birleştirerek “Sprinter” adlı bir program yazılmıştır.

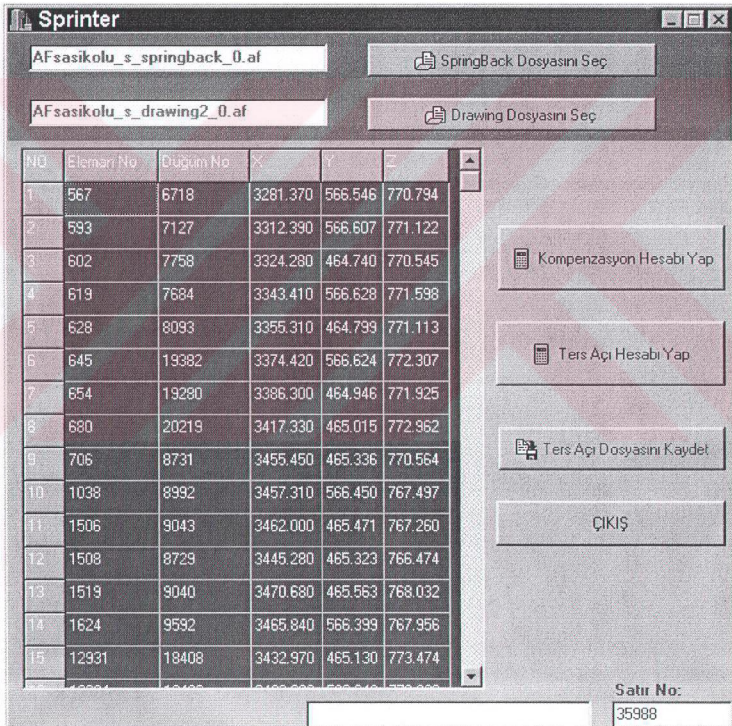
5.1.2 Sprinter Programının Tanıtılması

Sprinter programı yazımı için C++Builder V5.0 dili seçilmiştir. Bu sayede Windows ortamından tanıdık olan pencere ve fonksiyon düğmeleri gibi bilinen unsurları kullanmak mümkün olmuştur (Şekil 5.12).

Program yazılımında ilk aşama, yukarıda değinilmiş olan, AutoForm formatında yani “af” uzantılı geri yaylanma ve çekme ağ eleman bilgisini içeren iki dosya arasında düğüm noktası bazında önce fark bulma daha sonra da bu farkı çekme dosyasından

çıkarak üçüncü bir AutoForm dosyası üretmekti. Bu yapıldıktan sonra ters aç hesaplaması eklenmiş olarak üretilen dosyaların ve sonuçların geçerliliği hem AutoForm’da hem de ICEM Surf’de sorgulanarak onaylanmıştır.

OPTRIS’ten gelecek dosyalar için ise yapılması gereken işlem biraz daha zor olmuştur. Öncelikle Optris genelde dörtgen (quadratic) eleman kullandığı için bu dosyaların yapısı üçgen eleman kullanan AutoForm dosyasından farklıdır. OPTRIS pek çok formatta dosya üretebilmesine rağmen bunların içinde ASCII formatta olanları azdır. Yine bunların arasında da bizi, istemediğimiz hesaplamalara sokacak yapıda olanlar mevcuttu. Sözelimi yapılmak istenen sadece bir dört işlem olduğu



Şekil 5.12: Sprinter programı ana ekranı

halde bazı dosya formatları için elemanın normal vektörünü de hesaplamamız gerekmektedir. Ayrıca görsel ve ölçme amaçlı karşılaştırmalar için bu dosyanın AutoForm tarafından okunabilecek bir formatta olması da gerekmektedir. Bu durumda en uygun çözüm her iki yazılımında okuduğu ve üretebildiği üçüncü bir yazılım olan Nastran formatı seçildi. Nastran yine AutoForm ve OPTRIS benzeri bir sonlu elemanlar tabanlı bir analiz programı olup bir dönem bir yaygın olarak kullanılmıştır. Dosya yapısı ise önce düğüm noktalarının sıralanmasının ardından, dörtgen bir elemanın dört düğüm noktası verilerek tanımlanması şeklindedir. Koordinat değerleri hep 0 ile 1 arasında ondalıklı olarak verilirken E çarpan katsayısı ilave edilerek ifade edilmektedir. Düğüm noktaları çekmenin ilk aşamalarından itibaren numaralandırıldığından her aşamada düğüm noktası numarası artmaktadır. Bu yüzden Nastran dosyası, ağ yapısının o anki numaralandırmasına göre

```

$ NASTRAN FORMATTED FILE PRODUCED BY FICTURE
GRID*          962817  .374700000E+04  .621660828E+03F  1
* 1 .807882324E+03
GRID*          962818  .370854956E+04  .621624146E+03F  2
* 2 .807882813E+03
GRID*          962819  .367011084E+04  .621517334E+03F  3
* 3 .807883484E+03
GRID*          962820  .363149097E+04  .621307556E+03F  4
* 4 .807882813E+03
...
...

GRID*          1120520  .283103955E+04  .455613525E+03F  157704
* 157704 .761332397E+03
GRID*          1120521  .283225586E+04  .454494507E+03F  157705
* 157705 .761319275E+03
GRID*          1120522  .283224585E+04  .455624298E+03F  157706
* 157706 .761332947E+03
CQUAD4  943424  3  962817  1113782  1113785  1113784
CQUAD4  943425  3  962818  1113786  1113788  1113787
CQUAD4  943426  3  962819  1113629  1113631  1113630
...
...

CQUAD4  1097762  3  1116273  1098710  1120520  1120522
CQUAD4  1097763  3  1120522  1120520  1116176  1120521
CQUAD4  1097764  3  1120472  1120522  1120521  1116178
ENDDATA

```

Şekil 5.13: Nastran dosya yapısı

üretilmektedir. Hem Nastran formatına hem de bu duruma bir örnek olmak üzere Şekil 5.13’de, düğüm noktası numarasının 962 817’den başladığı görülmektedir.

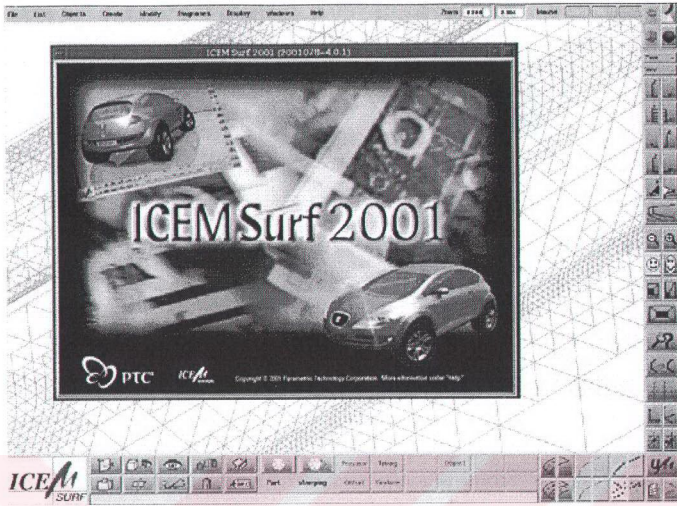
Nastran formatında elde edilen OPRIS dosyaları ilk etapta AutoForm’dan geçirilerek Sprinter programına sokulması düşünüldü. Ancak AutoForm dörtgen eleman yapısını üçgen eleman yapısına dönüştürürken çekme ve geri yaylanma dosyalarındaki bazı düğüm noktaları farklı elemanlara ait olabilmektedir. Bunun sebebi bir düğüm noktasının her iki dosyada bulunmasına rağmen koordinatlarının farklı olması nedeniyle ağ yapısını üçgene dönüştürme işlemi sırasında tolerans içinde veya dışında kalarak farklı bir elemana farklı bir numarayla atanmasıdır ve gayet doğaldır. Yani herhangi bir üçgen elemanın iki düğüm noktası diğer dosyadaki aynı üçgen elemanla aynıken üçüncü düğüm noktası numarası aynı olsa da farklı koordinatlara sahip olabilmektedir. Ancak bu durum önerilen yöntem açısından önemli bir probleme yol açmaktadır. Yöntemin esası aynı düğüm elemanın sac üzerindeki hareketi üzerine kurulmuştur. Eğer düğüm noktaları aynı numaralandırmaya göre dizilmezlerse yapılacak ters geri yaylanma işlemi anlamsız sonuçlar verir ve bu durum zaten denenerek tespit edilmiştir. Bu problemi çözmek için Nastran formatını üçgen elemana dönüştürmeden önce ters geri yaylanma işleminin Nastran formatında yapılması uygun görüldü. Böylece daha önce AutoForm dosyasına uygulanan işlemleri Nastran formatına uygulanması da gerekti. Bunu sağlayacak düzenlemeler yapıldı ve Sprinter programı hem Nastran hem de AutoForm dosyasını okuyup belirlenen matematik işlemleri uygulayabilen ve yine sonuç dosyasını Nastran ya da AutoForm formatında yazabilen bir hale geldi.

Program ters açı kontrolünü yukarıda ifade edilen kurguya göre hesapladıktan sonra bulduğu ters açığa sahip elemanı, eleman numarası, elemanın ilk düğüm noktasının numarası ve koordinatlarını listelleyerek programın ekranına yazdırır. Eğer istenirse bu liste text dosyası biçimde kaydedilebilir. Şeki 5.6’daki görünüm buna örnektir. Ters açı kontrolü için sadece AutoForm dosya formatında işlem yapmak mümkündür. Bu işlemi aynı zamanda Nastran formatındaki dosyalara da uygulayabilen hale getirmek gereksizdir. Çünkü üretilmiş Nastran formatında sonuç dosyası AutoForm içinden geçirilerek, AutoForm dosyasına dönüştürülebilmektedir ve işlem açısından bir sakıncası yoktur.

Bu aşamalardan sonra ise elimizde geri yaylanmayı telafi eden bir ağ yapısı bulunmaktadır. Bu yapı simülasyonlar dışında kullanılamaz durumdadır. Örneğin bilgisayar destekli imalat programlarının (CAM) takım yolu üretmesine ya da bilgisayar destekli tasarım programlarının (CAD) kalıp 3 boyutlu katı geometrisini oluşturmaya uygun değildir. En azından, örneğin PDGS (Product Design Grapichal System), WORKNC, ve PRO-Engineer gibi yazılımlar işleyebilmek için Bezier ya da Nurbs tabanlı yüzeylerden oluşmuş geometrilere ihtiyaç duymaktadırlar. Bu yüzden elimizdeki ağ yapısını referans alarak, yüzeyleri değiştirmeliyiz. Bunun için ICEM Surf programının kullanımı uygun bulunmuştur.

5.1.3 ICEM Surf Yazılımının Tanıtılması

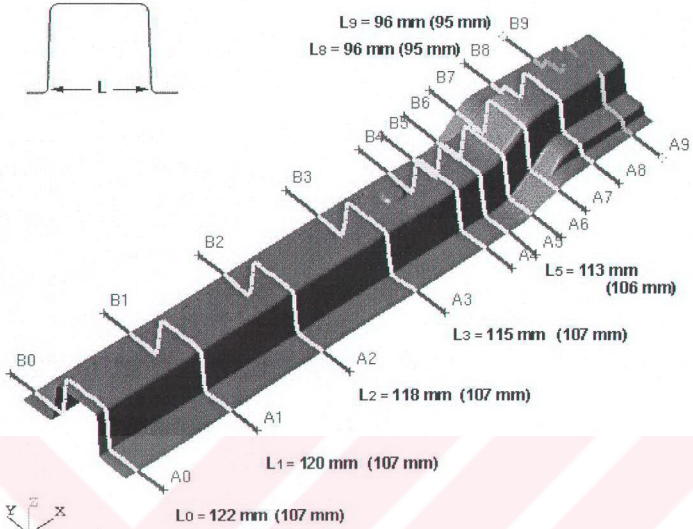
ICEM Surf yazılımı Almanya kaynaklı bir program olup araç dış panellerinin (A Class) yüzeylerinin geliştirilmesi amacı ile üretilmiştir. Sektörde gösterdiği başarı nedeniyle son iki yıl içinde PTC tarafından satın alınmıştır. Genel olarak yüzey geometri tanımlamasında Nurbs, ve Bspline'a oranla daha basit olan Bezier matematiğini kullanmaktadır. Amaç basit, kontrolü kolay ve kaliteli yüzeyler üretebilmektir. Bu aynı zamanda dezavantajını da oluşturmaktadır. Çünkü üretilen yüzeylerin kalitesi kullanıcının uzmanlık seviyesiyle doğru orantılıdır. Buna rağmen pek çok otomobil üreticisi tarafından özellikle dış sac panellerin yüzey geliştirmesinde tercih edilmiştir. Bunlar arasında Ford, BMW, AUDI, Volkswagen PSA, DaimlerChrysler, Hyundai, Kia sayılabilir. Bizim için önemli bir özelliği ise AutoForm dosyalarını doğrudan okuyabilmesi, okunan bu ağ yapı üzerinde kısıtlı da olsa bir takım işlemlerin yapılmasına olanak vermesi ve yine doğrudan AutoForm'a dosya üretebilmesidir. Şu an Türkiye'de lisanlı olarak sadece Ford Otosan'da bulunan ICEM Surf, bu firmada, Ürün geliştirme bölümünde, yukarıda belirtilen A Class yüzeylerin geliştirmesinde ve Takım Kalıp Alan Müdürlüğünde, Addenda, Binder olarak adlandırılan daha önce AutoForm yazılımının tanıtımında değinilmiş olan çekme kalıbı yardımcı yüzeylerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. ICEM Surf hakkında uygulama sırasında daha çok bilgi verilecektir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14: ICEM Surf yazılımının ana ekranı

5.1.4 Örnek Uygulama

Bu bölümde yukarıda ana hatlarını anlatılmaya çalışılan yöntemin gerçek panel üzerinde uygulaması yapılacaktır. Bunu için şapka kesitli arka şasi kolu paneli seçilmiştir (Şekil 5.15). Bunu nedeni hem geometrik olarak çok bilinen bir şekli olması hem de yüzey sayısı ve eğriliği az olduğundan işlem sürelerinin kısa olacak olmasıdır. Ayrıca elimizde deneysel ve teorik bilgisi en fazla olan paneldir. Söz konusu panele geri yaylanma bilgileri zaten bir önceki bölümde verilmişti



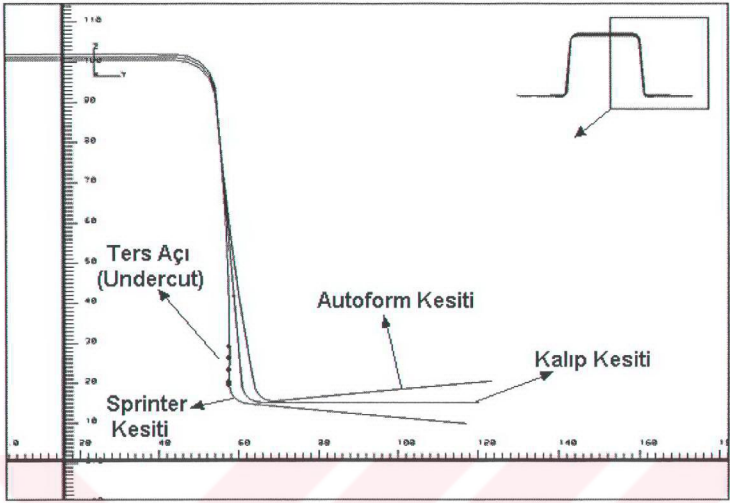
Process step: springback, Process time: 400.000
V10126-7-A-sim38

Dec 15 15:33:30 2001



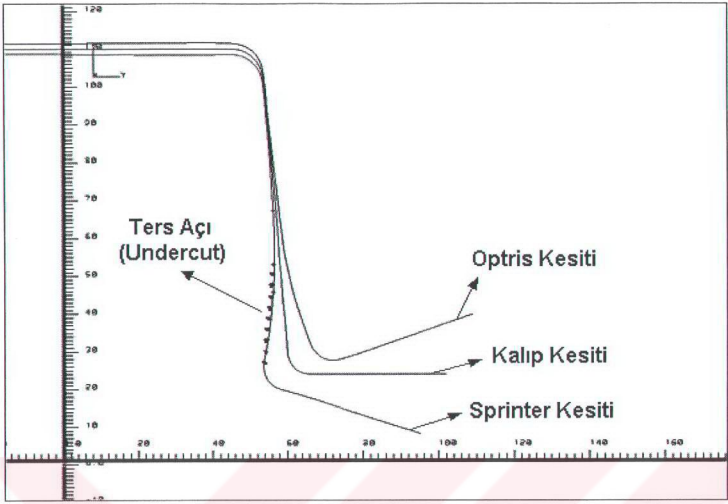
Şekil 5.15: Arka şasi kolu geri yaylanma miktarları ve kesitler

Şu halde elimizde hem OPRIS kaynaklı Nastran formatında, hem de AutoForm formatında çekilmiş saca ve geri yaylanmış saca ait ağ yapısını ifade eden dosyalar mevcuttur. Bu dosyalardan öncelikle AutoForm dosyasını Sprinter programından geçirerek yeni bir dosya elde edildi. Üç dosyanın A3-B3 kesitindeki karşılaştırması Şekil 5.16 da verilmiştir. Bu dosyaya aynı zamanda ters açı kontrolü de uygulandı ve Sprinter bazı noktalarda ters açı tespit etti. Daha önceki isimlendirmeye ilaveten bu kez Sprinter'ın hesapladığı ağ yapısının kesiti "Sprinter Kesiti" olarak ve bu kesitte oluşan ters açı "Ters açı (Undercut)" olarak gösterilmiştir. Ters açı oluşan noktalar ayrıca genel olarak ileriki sayfalarda gösterilmiştir..



Şekil 5.16: Sprinter'in panel geometrisinin, kalıp geometrisinin ve AutoForm'un hesapladığı geri yaylanmış panel geometrisin A3-B3 kesitinde karşılaştırması

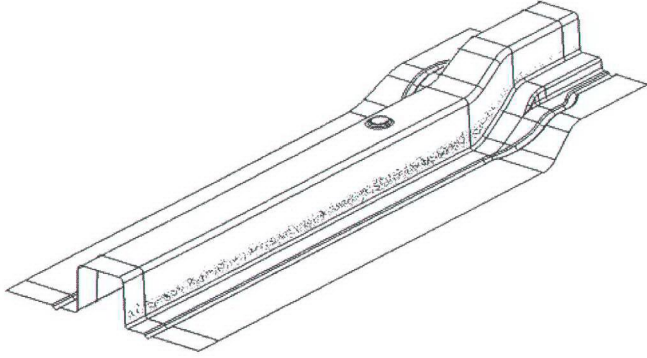
Şekil 5.16'da görüldüğü gibi panelin geri yaylanmasını düğüm noktası bazında oluşan deplasmanın vektörünü ters çevirerek yeni bir form oluşturma gerçekleşmiş oldu. Aynı işlemi Nastran formatında elde ettiğimiz OPTRIS dosyalarına uyguladığımızda elde edilen sonuç Şekil 5.17'de yine A3-B3 kesitinde gösterilmektedir.



Şekil 5.17: Sprinter'ın hesapladığı geometrinin, kalıp geometrisinin ve OPRIS'in hesapladığı geri yaylanmış geometrinin A3-B3 kesitinde karşılaştırması

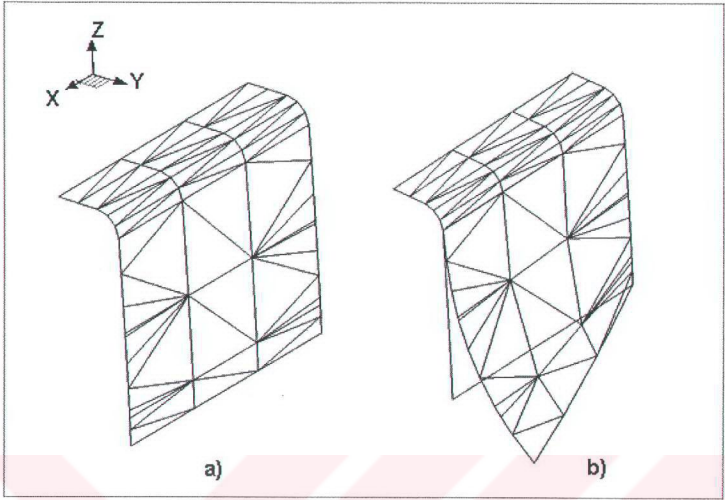
Sprinter programının algoritmasına göre Şekil 5.17'deki ters açı oluşan noktalar geri yaylanma geometrisine doğrudan bağlıdır. OPRIS ve AutoForm farklı geri yaylanmalar hesapladığından Sprinter programının sonuç dosyasında bulunduğu ters açı oluşan noktalar değişmektedir. Söz konusu noktalar OPRIS'te AutoForm'a göre daha fazladır ve Şekil 5.18'de OPRIS için gösterilmiştir.

Şimdi elde edilen Sprinter programının sonuç dosyasının iterasyonun ilk adımı için simülasyona sokulması gerekmektedir. Ancak buna engel olarak karşımıza ters açı içeren bölgeler çıkmaktadır. Ters açılı bir kalıbı gerçekte ve simülasyon ortamında



Şekil 5.18: Ters açılış noktaları

çekemeyeceğimiz için, öncelikle bu bölgelerin değiştirilmesi gerekmektedir. Bunun için bu dosya ICEM Surf yazılımının içine alınır. Bu programın içinde yapılabilecekler sınırlıdır. Ağ yapısını küçük miktarlarda değiştirmek için ICEM Surf'ün Clay (kil) komutu bir ölçüde yeterlidir. Ağ yapısının değişimini belli bir sınır içinde tutarak değiştirmek mümkün olmakla birlikte değişimi hem bölge hem de şiddet olarak kontrol altında tutmak zordur. Referans bir geometrideki değişimi oransal bir mantıkla ağ yapısına uygulamak, buna neden olmaktadır. Bu elbette tek tek düğüm noktası değişimi yapma yöntemine göre çok daha pratiktir. Ancak yaşanan deneyimler elimizdeki yazılımların bu alanda geliştirilmeye ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Düzlemsel bir referans yüzeyin kontrol noktalarının y ekseninde çekilmesi ile bir ağ yapısının ICEM Surf Clay modülü ile değiştirilmesi Şekil 5.19'te gösterilmiştir.



Şekil 5.19: Eleman ağ yapısının düzlemsel bir referans yüzey yardımı ile ICEM Surf içinde değiştirilmesi, a) değişimden önceki yapı, b) y yönünde çekilmesinden sonraki değişim

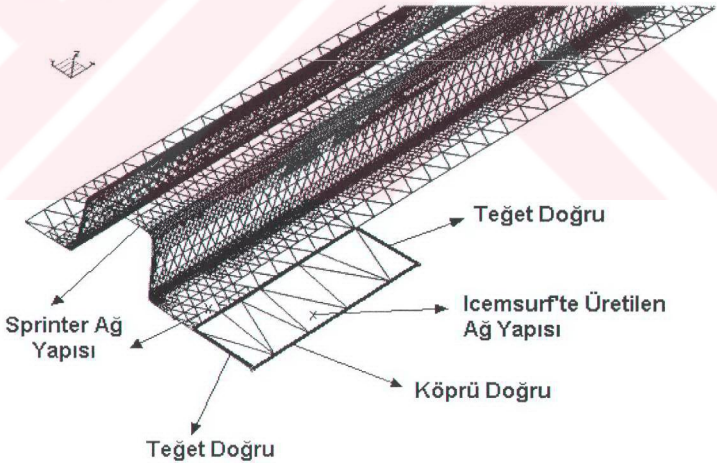
Ter açılı oluşan bölgeleri gidermek için parça formunda bazı değişiklikler yapmak gerekmektedir. Aslında parça ilk kez çekme operasyonu için hazırlanırken oluşan ters açılıları gidermek için konum açılarını değiştirmek, form alacak bazı bölgeleri, takip eden operasyonlara bırakmak gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ama Arka Şasi Kolu Paneli gibi simetrik bir panelde ters açılar da simetrik oluşmaktadır. Bu nedenle bu yöntemlerin bazıları geçersizdir. Ters açılı bir çekmeyi sağlamaya yönelik büyük kamalı sistemlerle bir konstrüksiyon düşünülebilir, ancak uygulama maliyetlerinin çok fazla olması, imalatının zor olması ve pot çemberi üzerindeki izafi hareketin denenmemiş bir uygulama olması ve her panele uygulanamayacak olması bu durumu fantezi olmaktan öteye götürmemektedir. O nedenle panel üzerinde ters açılıya giren bölgeleri daha pozitif açılı bir hale getirerek değiştirmek gerekmektedir. Bunun anlamı Sprinter'ın hesapladığı geometriyi değiştirmek, yani geri yaylanmayı telafi edecek olan geometriden sapmaktır. Ancak yapılacak değişikliğin çok büyük olmaması ve bu denemede amacımızın geri yaylanmayı tamamen telafi etmekten çok

önerdiğimiz yöntemin etkilerini görmek olduğu için ters açılı bölgeler formu değiştirerek giderilmelidir.

AutoForm'daki ters açılı bölgeler OPTRIS'e göre hem alan hem de şiddet olarak daha az olduğu için Sprinter programının hesapladığı geometri, ICEM Surf içine alınarak yukarıda bahsedilen Clay modülü yardımıyla geometri eleman ağ yapısı formatındayken değiştirilmiştir. Bu noktadayken ağ yapısında değişiklik yapmanın bazı yeni zorluklarından da bahsetmek gerekmektedir.

Ağ yapısı çekilmiş sacı temsil etmektedir. Bu geometriden erkek kalıbı tanımlamak mümkündür. Ancak üstten bakıştaki alanı, pot çemberindeki tutma aşamasındaki boyutundan çok daha küçüktür. Özetle pot çemberi tanımlamak için yeterli geometri yoktur. Bu durumda en akla yatkın olanı eldeki geometriyi kenarlarından teğet olarak uzatmaktır. Bu amaçla ICEM Surf içinde şu işlemler yapılabilir.

Önce flanş üzerinde teğet uzamanın değişkenliğinin az olduğu bir aralık belirlenir. Bu aralık farklı eğimlere sahip bir bölgede daha dar tutulmalıdır. Aralığın iki ucunda mevcut ağ yapının üzerinde birer doğru çizilir ve bunlar teğet olarak uzatılırlar.



Şekil 5.20: Eleman ağ yapısının ICEM Surf komutları yardımıyla teğet uzatılması

Uçları arasına birleştirici bir doğru daha eklenir. Şekil 5.20. ICEM Surf'ün Modify Scan (tarama datası değişikliği) mönüsünün altından Fedit (facet edit-eleman değişikliği) komutuna girilir. Create Facets (eleman yaratma) seçeneği seçildikten sonra, ilk olarak ekleme yapmayı düşündüğümüz ağ yapısını yani Sprinter ağ yapısı seçilir. Daha sonra ağ yapısının kenarı, iki tanjant doğru ve köprü doğrunun sınırladığı alan çevresinde noktalar seçilir. Bu işlemi yaparken seçilen bu noktalar arasına yakınlık önceliğine göre üçgen elemanlar oluşturulacağını dikkate almak gerekir. Seçme işleminin tamamlanmasıyla büyük ağ yapısına eklenmiş durumda elemanlardan oluşan bir alan elde edilmiş olur. Burada tarif edilen yöntemden farklı olmak üzere yine ICEM Surf içinde doğrulardan yüzey oluşturup bu yüzeyi tek bir komutla eleman ağına dönüştürdükten sonra ana yapıya eklemek mümkündür.

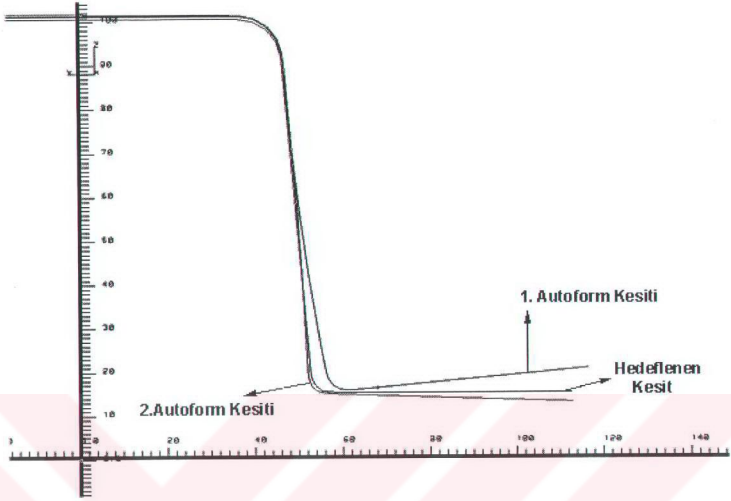
Tüm flanş kenarları boyunca yeterli miktarda uzatma yapıldıktan sonra bu yekpare yapıyı, simülasyon programı içinde bölerek erkek, dişi kalıp ve pot çemberi olarak tanımlamak AutoForm'da olanaksız ve OPRIS'te de çok zahmetli olduğundan simülasyona sokmadan bölmek gerekmektedir. Bunun içinse yine ICEM Surf'ün aynı mönü içindeki Divide Komutu kullanılır. Bu komut belirlenen bir hat boyunca eleman ağ yapısını ikiye bölmektedir. Ayrım hattı ICEM Surf içine alınarak bu işlem yapılır. Bu noktada hemen belirtmek gerekir ki bu işlemlerin Sprinter içersinde yapılabilmesi çok daha pratik olacaktır. Ancak şu aşamada bunu gelecekteki bir proje olarak görebiliyoruz.

Buraya kadar anlatılanlar AutoForm'daki ters açının az olması nedeniyle bu programın dosyasından üretilmiş olan Sprinter geometrisinin yani eleman ağ yapısının ICEM Surf içinde değiştirilmesiydi. Ters açı bakımından durum OPRIS'te daha kötüdür ve küçük değişikliklerle giderilemez. Mevcut ICEM Surf araçları zahmetli olduğundan ve panel yüzeyleri basit olduğundan OPRIS'ten çıkan dosyadan üretilmiş olan Sprinter geometrisini sadece referans olarak kullanarak çekme kalıbı yüzeylerini değiştirmek yoluna gidilmiştir. Referans ağ yapıdan kesitler alınarak bazen yeni yüzeyler üretilmiş, bazen de mevcutlarda değişiklikler yapılmıştır.

ICEM Surf'le bu aşamada yapılanları bitirmeden önce son bir özelliğinden daha bahsetmek iyi olabilir. İlk aşamada simülasyona sokulan Bezier yüzeyler hem üst

hem de alt kalıp parçalarını tanımlamakta kullanıldığı için, AutoForm ve OPTRIS içinde üst yada altta sac kalınlığı kadar boşluk (offset) verilmektedir. Simülasyondan çıkan eleman ağ yapısı sacı temsil etmektedir ve verilen boşluğun tam ortasında bulunmaktadır. Bu durumda simülasyona giren geometri ile çıkan arasında sac kalınlığının yarısı kadar bir fark oluşmaktadır. 0.8 mm’lik bir panelde bu 0.4 mm’lik bir fark anlamına geliyorken, 1.8 mm’lik bir sacda 0.9 mm olur. Önerdiğimiz yöntemdeki iterasyonların sayısının artmasıyla ilk verilen geometri ile son iterasyonlardaki geometrinin arasındaki fark daha da artar. Bu nedenle her iterasyon adımında bu miktar kadar boşluk geri alınmalı ve ilk verilen geometri gibi simülasyona sokulmalıdır. ICEM Surf’te bu amaçla kullanılabilecek yine aynı münün altında Offset komutu da mevcuttur. Eleman ağ yapısını seçilebilen iki yönde, yani içe veya dışa doğru belli miktarda boşluk oluşacak şekilde değiştirmek mümkündür.

Gelinen aşamada elimizdeki geometrileri tekrar simülasyona sokarak sonuçları yorumlamak gerekmektedir. AutoForm ve OPTRIS için hazırlanmış olan ağ yapı ve yüzey biçimdeki geometriler yapılan ilk simülasyonlarındaki parametreler değiştirilmeden tekrar simülasyona sokulmuştur. Burada panel formundaki değişikliklerden dolayı ayırım hattında küçük değişiklikler olabilir. Parametreler değiştirilmediği için simülasyonlar beklendiği gibi, daha önce belirtilen sürelerde ve eleman sayılarında gerçekleşti. Şimdi bu simülasyonları daha önceki geri yaylanma hesaplamayla karşılaştırmalıyız. Bu amaçla ilk hesaplanan geri yaylanma kesitine “1.AutoForm Kesiti” veya “1.OPTRIS Kesiti”, Sprinter’den geçirildikten sonra ters açıları giderilerek tekrar simülasyona sokulmasından sonra hesaplanan geri yaylanma kesitine “ 2.AutoForm Kesiti” veya “2.OPTRIS Kesiti” diyerek kesitler alınmıştır. Bu noktada kalıp geometrisi değiştiği için kalıp kesiti değişmiştir. Bu kesitlerde ilk kalıp kesitiyle yapılacak karşılaştırmalar için kalıp kesiti adlandırması anlam karışıklığına yol açabilir. O nedenle ilk kalıp kesiti ya da başka bir deyişle imal edilmek istenen parça kesitine “Hedeflenen Kesit” adlandırması yapılmıştır.

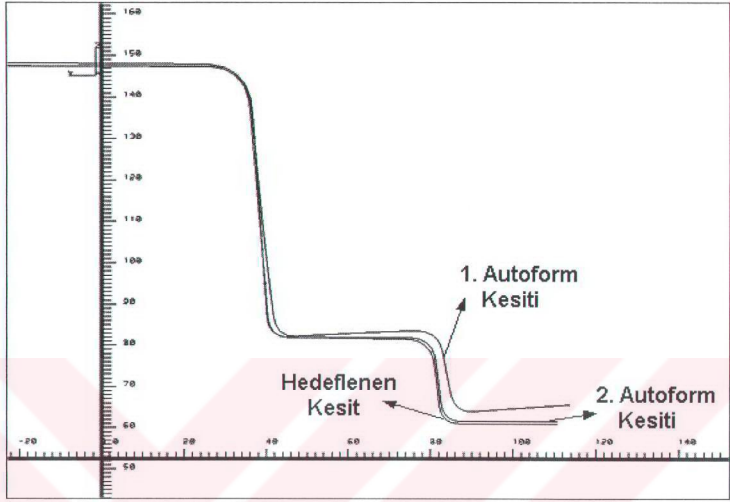


Şekil 5.21: A3-B3 kesitinde 1. ve 2. AutoForm simülasyon kesitlerinin karşılaştırılması

İlk olarak Şekil 5.21’de A3-B3 kesitindeki geometri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi 2. AutoForm kesiti birincisine göre hedeflenen parça kesitine çok daha yakındır ancak yine de geri yaylanmayı bir miktar düşük hesaplamış görünmektedir. Kesitin diğer yarısında açılma mevcuttur. Önceki bölümde verildiğine göre bu kesitte açıklık 107 mm’den geri yaylanmayla 115 mm’ye çıkmıştır. AutoForm kesitindeki açıklık ise 105 mm’dir. Buna göre AutoForm hedeflenen kesite tek tarafta negatif olmak üzere 1 mm yakın bir sonuç vermiştir. Burada kullanılan negatif kelimesi panelin şapka kesitinin açıklığının olması gerekenden az olmasını yani dar olmasını ifade etmektedir.

Yine AutoForm için bir kesit daha verilecek olursa, geri yaylanmanın açık uçta artmasına rağmen AutoForm bunun tersini yani açık uçta daha düşük bir geri yaylanma hesaplamıştır. Bu nedenle hem basamaklı bir yapıya örnek olması

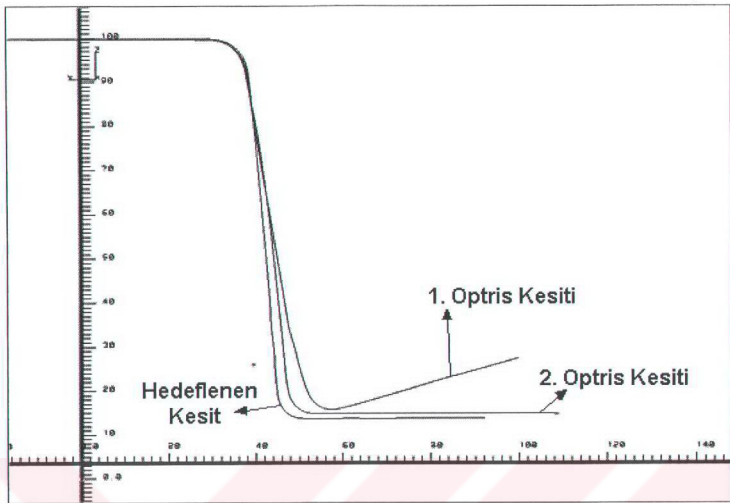
açısından hem de kısmen daha belirgin bir yaylanma için A8-B8 kesiti seçilmiştir. Şekil 5.16.



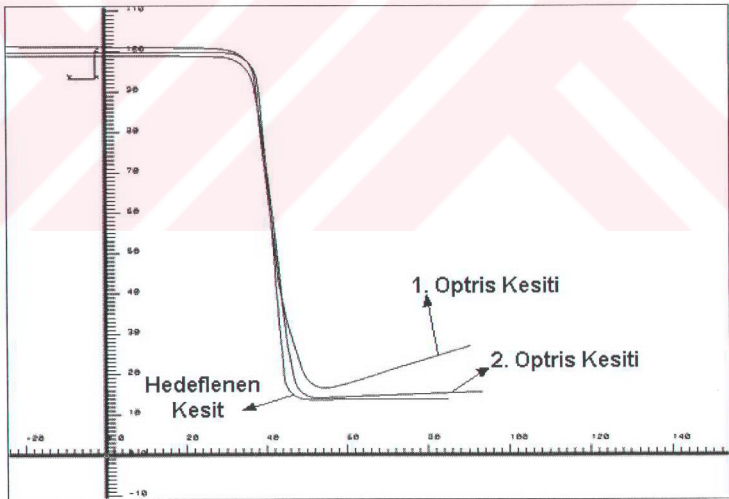
Şekil 5.22: A8-B8 kesitinde 1. ve 2. AutoForm simülasyon kesitlerinin karşılaştırılması

Bu kesitte görüldüğü gibi 2. AutoForm kesiti ihmal edilebilecek bir oranda hatayla doğrudur.

OPTRIS kesitlerinin karşılaştırması ise Şekil 5.23'daki A0-B0 kesitinde ve Şekil 5.24'deki A3-B3 kesitinde verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi OPTRIS Autoform'a göre daha büyük hata içermektedir. Bunun sebebi Sprinter'ın OPTRIS için önerdiği geometrideki fazlaca ters açılarının giderilmesi amacıyla geometriden sapılmış olmasıdır. Yapılan hesaplamalara göre OPTRIS hedeflenen kesite tek tarafta pozitif 2.0 mm'lik bir hatayla hesaplama yapmıştır.



Şekil 5.23: A0-B0 kesitinde 1. ve 2. OPRIS simülasyon kesitlerinin karşılaştırılması



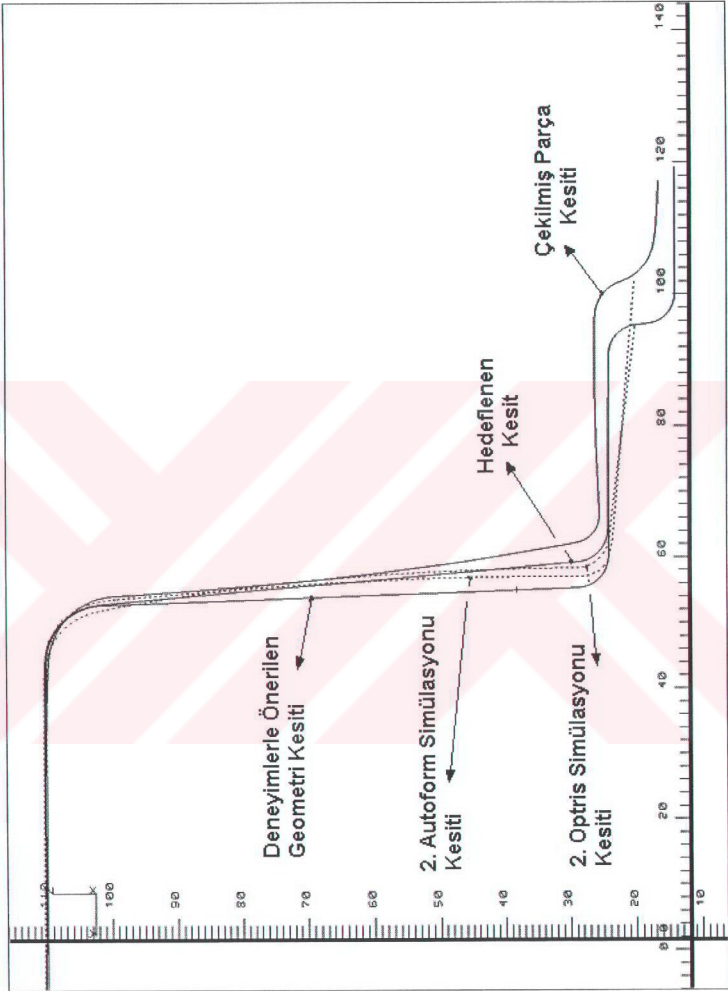
Şekil 5.24: A3-B3 kesitinde 1. ve 2. OPRIS simülasyon kesitlerinin karşılaştırılması

Yapılan bu karşılaştırmalar bize Sprinter programı yardımıyla yani önerdiğimiz yöntem yardımıyla hesaplanmış geometrilerin geri yaylanmayı azaltmak yönünde faydalı olduğunu göstermiştir.

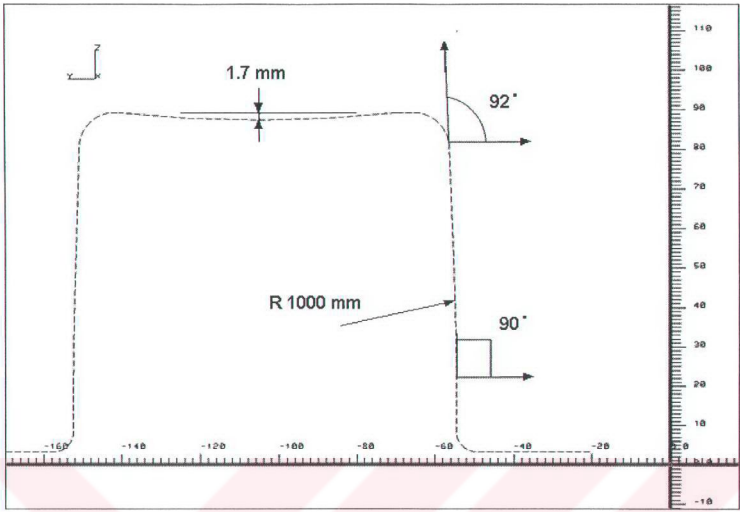
Bu çalışma devam ederken Ford Otosan Kalıp İmalat Ekipleri ve Metot Mühendisleri de parçanın sağlıklı imali için mevcut birikimleri yardımıyla öneriler oluşturmaktaydı. Bu çalışma sonlandığında henüz tam bir başarı sağlanamamış olsa da, önerilen kalıp geometrileri denenmiş ve geri yaylanmayı belli ölçüde azaltmak mümkün olmuştur. Atelye ortamında gelinen seviyenin, kalıp geometrisinin ve 2. simülasyon hesaplamalarında kullanılan geometrilerin kesitleri Şekil 5.25’de yine A3-B3 kesitinde gösterilmiştir.

Bu kesitte görüleceği gibi klasik birikim yöntemiyle önerilen geometri düz fakat açısız olarak kapanmış yani şapka kesitinin açıklığını azaltmış bir duvar geometrisidir. Bu geometriye göre çekme işlemi sonucunda sacta oluşan geri yaylanma “çekilmiş parça kesiti” etiketiyle gösterilmiştir ve doğru parça kesitine ilk geometriyle çekilen saca oranla daha yakın olmasına rağmen hala yeterli değildir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta klasik yöntemin alttaki flanşı geri yaylanma telafisinde değerlendirmeye pek almamakta ve genelde duvardaki geri yaylanma alınmış olsa bile flanş üzerinde kalmaktadır. Bunun nedeni çoğunlukla bu flanş üzerinde ilerleyen operasyonlar ütülem tanımlanmış olmasıdır. Bizim bu çalışma içinde önerilen yöntem ise bu flanşda geri yaylanma telafisi içinde değerlendirmekte ve hemen ilk iterasyonlardan itibaren düzelme sağlamaktadır. Önerilen yöntemin diğer bir farkı düz duvar geometrisi yerine eğrilik yarıçapı olan bir duvar önermesidir. Bilindiği gibi her türden eğrilik geri yaylanma da açılma yani yarı çapın büyümesi yönünde çalışmaktadır. Bu durumun ters açığa girmek gibi bir dezavantaj içermesine rağmen, parabolik bir geri yaylanmanın telafisinde yine ters parabolik bir geometri kullanmak daha mantıklıdır. Nitekim bu çalışmada önerilen önerdiğimiz yöntemle yapılan geometrilerin dip açıklığı daha fazla görünmesine rağmen elde edilen geri yaylanma değerleri düz duvar önerisine göre kötü değildir. Zaten bu çalışmanın sonlandığı anlarda klasik yöntemle önerilen yeni geometri duvarda ters parabolik bir yapı içermekteydi. Ayrıca üst düzlük alanda da aşağıya doğru bir sehim uygulanmasına kararı verilmişti. Ancak bunu panel geometrisinin tamamına

uygulamak mümkün değildir ve gerekli sehim miktarını tespit etmek uzun ve zahmetli bir iştir (Şekil 5.26). Sprinter'dan çıkan geometrideki ters aç



Şekil 5.25: A3-B3 kesitinde geometrilerin karşılaştırılması

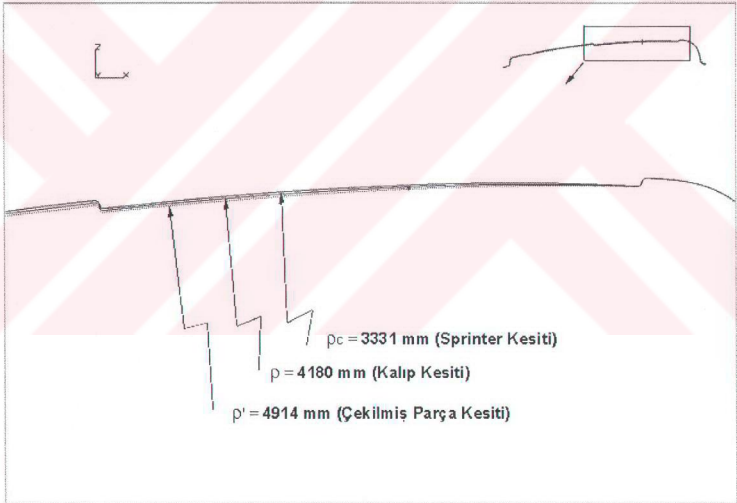


Şekil 5.26: Atelye çalışmaları sonucunda önerilen geometriden bir kesit

nedeniyle, bu geometriyi imal etmedeki zorluklara daha önce değinilmişti. Bu tür durumlarda panel üzerindeki bölgeler önemlerine göre sıralanabilir ve önemli bir bölgedeki geri yaylanmayı gidermek ve azaltmak için daha az önemli başka bir bölgedeki geometri değiştirilebilir. Üst bölgedeki sehim uygulaması buna bir örnektir. Flanş bölgesindeki geri yaylanmayı azaltmak için parçanın fonksiyonunu etkilemeyen üst bölgede böyle bir şekil değişikliği yararlı olacaktır. Ayrıca yine bu mantıkla ürünün tasarımında, geri yaylanmayı giderecek küçük değişimler talep edilebilir.

Yukarı da önerilen yöntemin arka şasi paneline uygulanması ve sonuçları aktarılmıştır. Aynı yöntemin, yapısı çok daha karmaşık olan diğer panellerde de denenmesi gerekmektedir. Bu anlamda tüm süreci olmasa da en azından ilk aşamayı, yani Sprinter hesaplamasını arka kapı dış panel üzerinde gerçekleştirme kararı verilmiştir. Bu hesaplamanın neticesinde panelin pencere bölgesinde 2.35 mm lik çökmenin Sprinter'da telafi edilerek hesaplandığı görüldü. Bu sonuç olumludur ancak paneldeki geri yaylanmanın sorun olarak ağırlığı hissettirdiği nokta bu tür küçük ötelemeler değildir. Panel aracın dış yüzeyine ait olduğu için aracın genel

görünümünü etkilemektedir. Bu yüzden tasarlandığı forma sahip olması gerekmektedir. Söz konusu panelin çekilmiş sacında yapılan gözlemler pencere bölgesinde eğrilik yarıçapında artma olduğunu göstermiştir (Şekil 5.26). Diğer bir deyişle panel pencere bölgesinde “düzleşmektedir.” Bu durum potansiyel müşteri gözüyle bakıldığında ilk anda göze çarpmak bir yerdedir. Gerçi bazı modellerde bu bölgeye pencere takılmakta ve eğrilik yarıçapındaki bu değişim bir sorun teşkil etmemektedir. Ancak bazı modellerde pencere yoktur ve bu tür küçük farklar içeren tüm arka kapı dış panelleri aynı çekme kalıbında çekilmektedir. Kısaca kalite standartlarına göre sorun olarak tespit edilmiş bu durumu çözmek gerekmektedir. Bu amaçla henüz bu tez çalışması başlamamışken, metot mühendislerinin önerisiyle eğrilik yarı çapındaki artış telafi geometrisi oluşturmak için düşürülerek kalıba uygulanmış ve geri yaylanmanın yol açtığı geometrik sapma miktarında azalma sağlanmıştır. Şekil 5.27’ye bakılırsa kalıp kesitindeki eğrilik



Şekil 5.27: Arka kapı dış panelinin A3-B3 kesitinin pencere bölgesinde geri yaylanma neticesinde eğrilik yarıçapındaki değişim (ρ , ρ') ve Sprinter Programının önerdiği kesitteki eğrilik yarıçapı (ρ_c)

yarıçapındaki artış, telafi geometrisinde azalma olarak hesaplanmıştır. Bu durumu oransal ifade etmek gerekirse, kalıp kesitindeki eğrilik yarıçapında geri yaylanma neticesinde %17.5'luk bir artışın meydana geldiği, ve buna karşılık Sprinter programının önerdiği kesitte eğrilik yarıçapında %20'lik bir azalma önerildiği ifade edilebilir. Bu değişim miktarları, metot mühendislerinin deneyimlerine dayanarak önerilmiş geometrinin uygulandığı kalıp geometrisiyle karşılaştırılmış ve sonuç olarak Sprinter programının önerdiği geometrinin kabul edilebilir bir öneri olduğu görülmüştür.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Özet

Bu bölümde, araştırma sonucunda elde edilen önemli sonuçlar ve ileride yürütülebilecek çalışmalar için öneriler tartışılacaktır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında tamamlanan araştırma faaliyetleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Başlangıç olarak, modern sac şekillendirme ve kalıp tasarımı teknolojileri ve tasarımında sonlu eleman yönteminin yeri araştırılmış ve özetlenmiştir.
- Sac şekillendirme kalıp tasarımında yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemleri arasından kullanma imkanı elde edilen kapalı yöntemle çalışan ticarî yazılım AutoForm ve açık yöntemle çalışan ticarî yazılım OPTRIS'in tanıtımları yapılmıştır.
- Ardından seçilen analiz yöntemlerini denemek üzere, değişken şapka kesitli bir sac parça tasarlanmış ve bir otomotiv firmasında bir hafif ticari araç için üretim hazırlıkları yürütülen ön göğüs iç paneli, arka kapı dış paneli ve arka şasi kolu paneli adlı üç adet parça, vaka analizleri için seçilmiş geometri, kalıp, malzeme ve mevcut deneysel ölçüm verileri derlenmiştir.
- Dört adet deneme parçasından her biri için AutoForm ve OPTRIS kullanılarak çekme işlemi ve ardından gelen geri yaylanma simüle edilmiştir.
- Bu simülasyonlarda hesaplanan geri yaylanma miktarları ve geri yaylanma şekilleri ile çekme kalıbından çıkmış gerçek panellerden derlenmiş deneysel veriler arasında seçilen bazı kesitlerde kısmi karşılaştırmalar yapılmıştır.

- Kalıp çekme yüzeyi geometrisinin parça yüzeyiyle aynı olduğu durumdaki deneysel ölçüm ve sayısal hesaplama sonuçları arasında şekillenme ve geri yaylanmada bazı yön ve miktar farkları (hata payı) olmakla beraber, kalıp tasarımı, özellikle geri yaylanmanın telafi edilmiş olduğu yeni çekme yüzeyi geometrisinin belirlenmesinde (“over-crown” hesabı) her iki yazılımın da kullanılabileceği anlaşılmıştır.
- “Over-crown” hesabı için birinci simülasyon şekillendirme ve geri yaylanma hesabı sonuçlarından, sonlu eleman düğüm noktası koordinatları üzerinde basit bir vektörel geri öteleme yöntemi geliştirilmiş, daha sonra AutoForm ve OPTRIS çıktıları üzerinde gerekli geometrik işlemleri gerçekleştirmek üzere “Sprinter” adında bir bilgisayar programı yazılarak uygulanmıştır.
- “Sprinter” programının kalıp geometrisi için önerdiği geri yaylanma telafisi yapılmış sonlu eleman ağ yapısındaki geometri, program çıktılarını okuyan ICEM Surf adlı ticarî BDT programı yardımıyla kalıp çekme yüzeyi matematik modeline yansıtılmış ve böylece yeni kalıp geometrisi oluşturulmuştur.
- AutoForm ve OPTRIS simülasyonları bu defa yeni kalıp geometrileri kullanılarak tekrar edilmiş, ve geri yaylanma sonucu oluşan parça geometrisinin istenen parça geometrisine ilkinden çok daha yakın olduğu gözlenmiştir.
- Bazı panellerde geometri gereği “over-crown” hesabı sonucu çıkan ters aç (under-cut) durumunda kalıp geometrisinde ne gibi değişiklikler yapılabileceği araştırılmış ve sonuçlar yine bazı simülasyonlar aracılığıyla test edilmiştir. Böylece geliştirilen geri yaylanma telafi yönteminin kısıtlamaları da açığa çıkmış ve tartışılmıştır.

6.2. Sonuçlar ve Öneriler

Karşılaştırma sonucunda simülasyonda hesaplanan geri yaylanmalar ile gerçek panellerdeki geri yaylanmaların bazı bölgelerde tam olarak uyduğu, bazı bölgelerde hem karakter hem de miktar olarak örtüşmediği, ve yine bazı bölgelerde ise karakter olarak aynı olsa da nicel olarak farklı olduğu görülmüştür. Genel bir değerlendirme yapmak gerekirse, OPTRIS yazılımının AutoForm’a göre çekme simülasyonlarında

daha sağlıklı ve gerçeğe yakın sonuçlar verdiği, ancak simülasyon zamanının çok uzun olması ve AutoForm'da sunulan ilave araçlar nedeniyle, AutoForm yazılımının da hedeflediği amaç için yani hızlı, kullanımı kolay çekme simülasyonu programı olarak yeterli olduğu söylenebilir. Geri yaylanma hesaplaması için ise OPTRIS çok daha tutarlı ve gerçekçi sonuçlar vermektedir. AutoForm'un ise henüz bu konuda tam anlamıyla güvenilir olmaktan uzak olduğu gözlenmiştir.

İdeal şartlarda geri yaylanma hesaplamasının gerçek panelle çok küçük bir hata payı ($<1\text{mm}$) ile aynı olması istenmektedir. Ancak bu mümkün olmamıştır. Bu durumun bir kaç nedeni vardır. İlk neden yazılımların yukarıda belirtilen farklılıklarına rağmen halen geri yaylanmayı tam anlamıyla doğru hesaplayamamış olmalarıdır. Bu konuda yazılımların performansı panel ve kalıp geometrisinden, simülasyon yöntemine kadar pek çok parametreye bağlıdır. Diğer bir neden ise simülasyon parametrelerinin gerçek çekme parametreleriyle uygunluğudur. Bu çalışmada bu konuda olabildiğince titiz davranılmıştır, ancak belli bir hata payını kabullenmek gerekir. Süzdürme çubuğu yüksekliğinin bir kaç milimetre düşürülmesi, sacın biraz fazla yağlanması, kalıp yüzeyindeki pürüzlülük, ham sacın kalıba yerleştirilişindeki küçük kaydırmalar, presten kaynaklanan etkiler ve en nihayetinde yazılımda yapılan lineer kabuller, bu hatalara neden olur.

Son bir neden olarak ise gerçek panelin ölçülmesi sırasında oluşması muhtemel hatalar sayılabilir. Geri yaylanma tüm paneli etkilediğinden ve ölçme işlemi panel üzerine her hangi bir yük yokken yapılacağından, panel yüzeyleri olmaları gereken koordinatlarda olmayabilir. Hatta aynı panelin aynı ölçme aparatına iki ardışık yerleştirilişi arasında dahi fark olabilmektedir. Bu problemi en aza indirebilmek için simülasyonda en az geri yaylandığı görülen bölgeler sabitlenerek ölçüm yapılması bir yoldur. Ancak burada da simülasyonun sağlıklı hesaplama yaptığını kabul etmek gerekir. Yapılan çalışma ise bu kabulün her durumda geçerli olmadığını göstermektedir. Panelin uygun olduğu durumlarda diğer iyi bir yöntem de sacın erkek kalıp parçası üzerine yatırılması ve sacın bu serbest halindeyken ölçüm yapılmasıdır. Bu yöntem arka şasi kolu paneli ve ön göğüs paneli ölçümlerinde kullanılmış ve işe yararlığı tespit edilmiştir.

Tüm bu tespitlerin ışığında, sonlu elemanlarla pek çok çözümsüz görünen teknik problemin çözümünün mümkün olması gibi sac şekillendirmede geri yaylanma tahminin de aynı yöntemle çözülebileceğini söyleyebiliriz. Şu an yapılan tahminler güvenilirliğini henüz ispatlayamamış olsa da bu konudaki gelişmelerle yakın gelecekte bu mümkün olacaktır. Ayrıca geri yaylanma probleminin sac şekillendirmedeki önemi nedeniyle başarılı çözümler yapan birbirinden farklı pek çok yöntem olacağını düşünebiliriz.

Bu varsayıma dayanarak geri yaylanmayı gidermeye yönelik bir yöntem önerilmiştir. Sacın geri yaylanması esnasında düğüm noktası bazındaki değişimini miktar olarak aynı tutup, vektörel olarak ters yönde hesaplayan bu yöntem, kalıp geometrisinde yine düğüm noktası bazında hesapladığı miktar kadar değişim önermektedir. Bu sayede elde edilen geometriler geri yaylanma telafisi içermektedir. Gerekli geometrik düzenlemeler, ICEM Surf yardımıyla arka şasi kolu paneli için yapıldıktan sonra, tekrar simülasyona sokulmuştur. Simülasyon neticesinde paneldeki geri yaylanma miktarlarında olumlu gelişmeler saptanmıştır. Parça için kritik olan flanşlı duvar açıklığında sağlanan gelişmeler Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1: Arka şasi kolu panelinde geri yaylanma telafisindeki gelişmeler: Verilen değerler şapka kesitinin olması gereken açıklığından sapma miktarlarıdır.

Geri Yaylanma Değerleri	AutoForm Hesaplaması	OPTRIS Hesaplaması
Çekme Kalıbı Yüzeyleri	7 mm	8 mm
Önerilen Yöntem Yüzeyleri	-2 mm	4 mm
Gerçek Paneldeki Miktar	8 mm	

Bunlara ek olarak, yöntem geri yaylanmış geometriyi temel aldığı için geri yaylama telafisi içeren geometriyi oluştururken tüm form değişikliklerine duyarlıdır. Parabolik eğri duvarlar, yukarı açılan flanşlar gibi klasik yöntemlerde üzerinde çok durulmayan hataları da gidermektedir. Kısaca geri yaylanma telafisini tüm geometri için hesaplamaktadır. Ayrıca sadece arka şasi kolu paneline uygulanmış olan bu yöntemin ilk aşaması, daha önce klasik yöntemlerle sonuçlandırılmış olan arka kapı dış paneline de uygulanmıştır. OPTRIS’ten gelen geometriler üzerindeki

hesaplamalara göre önerilen geometrinin, kalıp alıştırma atelyesinde sınama-yanılma yöntemiyle yapılmış olan geometriye yakın olduğu görülmüştür.

Gelinen bu olumlu sonuca rağmen önerilen yöntem henüz bazı açılardan eksiktir ve tam bir etkinlikle kullanılmak üzere geliştirilmelidir. Yapılan geometri değişimi doğrusal olduğundan büyük eğriliğe sahip (küçük radyüslü) bölgelerde hata içermektedir. Bu nedenle daha doğru düğüm noktası değişimleri yapabilmelidir. Örneğin düğüm noktasının sadece geri yaylanmadan önceki ve sonraki konumlarını değil, aynı zamanda bu iki nokta arasında izlediği yolu da hesaba katabilmelidir. Bu yolun doğrusal veya dairesel olmasına göre farklı hesaplamalar yapılabilir. Yöntemin diğer bir eksikliği ise, ICEM Surf'teki ara işlemlerdir ve bu ara işlemleri giderecek yöntemler geliştirilmelidir. Çünkü hem ICEM Surf programı eleman ağ yapısını değiştirmekte çok iyi değildir, hem de 150 000 eleman sayısına ulaşan bir geometriyi değiştirmek donanımı zorlamaktadır. Yöntemi algoritma halinde işleyerek kolay uygulanabilir hale getiren Sprinter programının ilk etapta, ayırım hattının eleman ağ yapısını bölmesinde ve pot çemberi kenarlarının teğet uzatılmasında kullanılacak şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca ters açının giderilmesi için bazı otomatik eleman oluşturma yöntemleri içerebilir. Yönteme ve Sprinter'a yönelik bir diğer öneri, sacdaki değişimleri hesapladıktan sonra yine eleman ağ yapısı şeklinde alınmış olan kalıp parçalarına bu değişimi yansıtip, kalıp parçalarını eleman ağ yapısı şeklinde üretebilmesi olabilir. Çok daha sonraki, ideal bir nokta ise bu işlemlerin ve Sprinter'ın AutoForm yada OPTRIS gibi bir paket programa göre düzenlenip o paket programın bir modülü gibi çalışmasıdır.

Önerilebilecek bir başka nokta ise geri yaylanmanın değişkenliğinin, malzeme, pres dinamiği ve çalışma şartlarının değişkenliğine ne ölçüde bağlı olduğunun araştırılmasıdır.

Sıralanan tüm bu eksiklere rağmen, sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmış bilgileri kullanan bu yöntem, geri yaylanmanın telafi edilmesinde, mevcut deneyim ve sınama-yanılmaya dayalı çalışmalara yardımcı olacak bir unsurdur ve geliştirilerek bu konudaki çözümlere daha yüksek bir oranda katkıda bulunabilecektir.

Sonuç olarak yapılan bütün, bu ve benzeri çalışmalar sac şekillendirmede geri yaylanma probleminin önemini, ve bu probleme sonlu elemanlar yöntemiyle zm getirme çabalarını n plana ıkarmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Chandrupatla, T. R. and Belegundu, A. D., 1991. Introduction To Finite Elements In Engineering, Prentice-Hall, New Jersey
- [2] Marciniak, Z. and Duncan, J.L., 1989. The Mechanics Of Sheet Metal Forming, Edward-Arnold, TCY Press, New York
- [3] Karafillis, A.P. and Boyce, M.C., 1991. Tooling design in sheet metal forming using springback calculations *Int. J. Mech. Sci.* **34**, 113-131.
- [4] Karafillis, A.P. and Boyce, M.C., 1995, Tooling and binder design for sheet metal forming processes compensating springback error, *Int. J. Mach Tools. Manufact.*, **36**, 503-526.
- [5] Autoform Engineering GmbH 2001 AutoForm 3.03 User's .Manual, Techoparkstrasse 1. CH-8005 Zurich Switzerland
- [6] ESI Group, 2001. OPTRIS User's Guide Parc Club du Golf 13856 Aix en Provence cedex 3 France
- [7] PTC ICEM Systems GmbH, 2001 ICEM Surf User's Guide Pub.Nr:E0100434, Küsterstrase 8, D-30519 Hannover Germany
- [8] Rebelo, N., Nagtegaal, J.C. and Taylor, L.M., 1991. Comparison of implicit and explicit finite element methods for analysis of sheet metal forming problems, Dusseldorf, Germany, *SAE Papers* **917115**
- [9] Miller, M. ,William, T., Li, X., Ahmetoğlu, M., Akgerman, N., and Altan, T., 1977. A systematic approach to automotive stamping design with finite element analysis, *Near Zero Stamping Topical Reports ERC/NSM-S-97-R-005* Columbus, OH
- [10] Livatyali, H. ,1998 Computer Aided Process Dizayn of Selected Sheet Metal Bending Processes-Flanging and Hemming, *Doktora Tezi* Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University

- [11] **Tang S. C.** ,2000 Trends on Simulation of Sheet Metal Forming Processes, *SAE Papers*, **2000-01-1108**
- [12] **Zhang Z. T. And Lee D.** ,1996 Springback Analysis and Control in Forming Two-Step Rail-Shaped Sheet Metal Parts, *Society of Automotive Engineers*,**960596**
- [13] **Makinouchi,A.** ,1996 Sheet Metal Forming Simulation in Industry, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. **60**, pp.19-26
- [14] **Cerit M.A.** ,1976 Makina Mühendisliği El Kitabı, TMMOB Makina Mühendisliği Odası, Ankara

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Murat ERGELDI 1970 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu. 1988 yılında İzmir Çınarlı Anadolu Teknik Lisesi Elektronik Bölümünden mezun olarak İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümüne kayıt yaptırdı. Buradaki eğitimini 1993 yılında tamamlayarak mezun oldu.

Halen İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitime devam etmekte ve Ford Otosan firmasında Takım Kalıp Alan Müdürlüğünde Metot Mühendisi olarak çalışmaktadır.

