Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi
Cilt: 12, No: 2, 2015 (75-95)

Electronic Journal of Machine Technologies
Vol: 12, No: 2, 2015 (75-95)

TEKNOLOJİK ARAŞTIRMALAR

www.teknolojikarastirmalar.com
e-ISSN:1304-4141

Makale
(Article)

Çift Fazlı Çeliklerden Üretilen Otomotiv Sac Parçalarının Dizaynında Geri Esnemeyi Optimize Edebilmek İçin Sac Kalınlığına Bağlı Olarak Büküm Radyüslerinin Belirlenmesi

Murat ŞEN, Ensar YILDIRIM, Halit ÇEBİ, Cemil ÖZDEMİR
Yıldız Kalıp A.Ş. Hadımköy Yolu Ömerli Mahallesi, Arnavutköy-İstanbul, Türkiye
murat.sen@yildizkalip.com, ensar.yildirim@yildizkalip.com, halit.cebi@yildizkalip.com, cemil.ozdemir@yildizkalip.com

Özet

Son yıllarda otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bunlar arasında çift fazlı (DP) çelikler yüksek mukavemet ve şekillendirilebilirlik açısından ön plana çıkmaktadır. Ancak, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DP çelik sac malzemelerinin içyapı karakteristiklerinden ötürü şekillendirilme sonrasında geri esneme sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, farklı kalınlıklardaki DP600 sac parçaların şekillendirmesi sonrasında oluşacak geri esnemeyi telafi edebilmek amacıyla sac kalınlıklarına (T) bağlı olarak optimum büküm radyüslerinin (R) tespiti Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile gerçekleştirilmiştir. Analiz işlemi Bilgisayar Destekli Çizim (CAD) programında çizilen kalıp elemanlarının simülasyon programında tanıtılması ve işlem için gerekli parametrelerin (pres kuvveti, sürtünme katsayısı, sac boyutları vb.) girilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Farklı sac kalınlıkları ve büküm radyüsleri için bu işlem tekrar edilerek sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan analizler sonrasında, aynı sac kalınlığındaki parçaların büküm radyüslerinin arttırılmasıyla şekillendirme sonrasındaki geri esnemelerin arttığı tespit edilmiş ve parça sac kalınlıklarının artmasıyla da geri esneme değerlerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geri esneme, çift fazlı sac malzeme, Sonlu elemanlar analizi (FEA), Büküm yarıçapı

Determination of Bend Radii based on Sheet Metal Thickness to be Able to Optimize Springback in the Design of the Automotive Sheet Metal Parts Produced From Dual Phase Materials

Abstract

Use of high-strength steels in automotive industry has become pretty widespread in recent years. Among these, dual phase (DP) steels come into prominence in terms of high-strength and forming ability. However, the problem of springback comes up after molding because of the microstructural characteristics of the DP steel sheet materials used widely in the automotive industry. That's why; in this study, the optimum bend radii were (R) determined using the Finite Element Analysis (FEA) based on the sheet metal thickness (T) in order to compensate for the springback to happen after the forming of the DP600 sheet metal parts with different thicknesses. The analysis was carried out by mounting the mold elements drawn in the Computer Aided Design (CAD) software into the simulation software and typing in the parameters necessary for processing (press force, friction coefficient, sizes of sheet metals etc.). This procedure was repeated for different sheet metal thicknesses and bend radii, and results were obtained. As a result of the analyses, it was observed that the springback following molding increased with the increases in the bend radii of the parts with the same sheet thickness, and it was also found out that the springback values decreased with the increases in the thicknesses of the sheet metals of the parts.

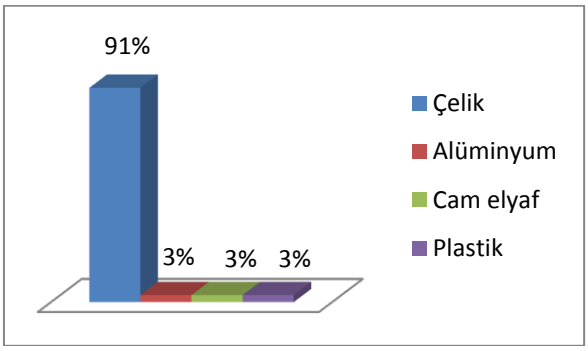
Keywords: Springback, DP600 dual phase sheet materials, Finite elements analysis (FEA), Bend radii

Bu makaleye atıf yapmak için
Şen M, Yıldırım E., Çebi H.,Özdemir C.,"Çift Fazlı Malzemeler İle Üretilen Otomotiv Sac Parçalarının Dizaynında Geri Esnemeyi Optimize Edebilmek İçin Sac Kalınlığına Bağlı Olarak Büküm Radyüslerinin Belirlenmesi" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 2015, 12(2) 75-95*

How to cite this article
Şen M, Yıldırım E., Çebi H.,Özdemir C.,"Determination of Bend Radii based on Sheet Metal Thickness to be Able to Optimize Springback in the Design of the Automotive Sheet Metal Parts Produced with Dual Phase Materials" Electronic Journal of Machine Technologies, 2015, 12 (2) 75-95*

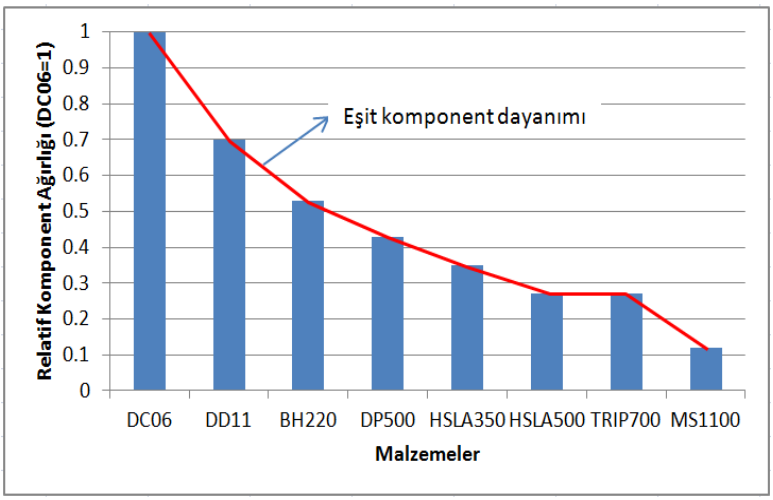
1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde çift fazlı (DP), yüksek mukavemete sahip sac malzemelerin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. DP çelik sacların kullanılmasıyla araç ağırlıklarında azalma, yakıt tüketiminde düşüş ve buna bağlı olarak da çevreye daha az egzoz gazı salınımı gerçekleşmiştir. DP çeliklerin yüksek mukavemet sağlaması da malzeme seçiminde daha tercih edilebilir olmasını sağlamıştır [1, 2]. Kullanılan farklı malzemelere göre kazalarda koruma oranı açısından karşılaştırma Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu şekilden görüleceği üzere çift fazlı çelikten üretilen otomotiv parçaları alüminyum, cam elyaf ve plastikten üretilenler ile kıyaslandığında yüksek oranda koruma sağlamaktadır.



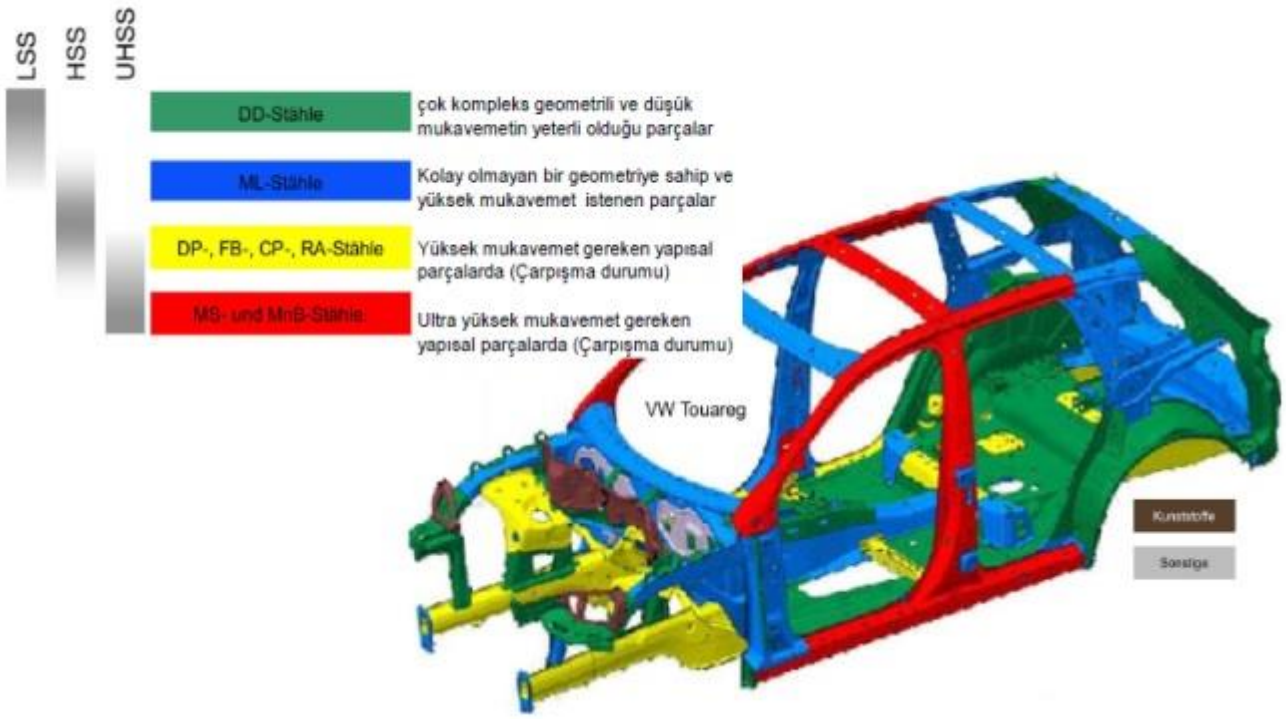
Şekil 1. Farklı malzemelerin kazalarda koruma oranı [1,2].

DP çeliklerle aynı dayanıma daha düşük ağırlıkta ulaşılmaktadır. Bu da yukarıda bahsedildiği üzere araç ağırlığının düşük olmasını sağlamaktadır. Şekil 2'de farklı malzemelerin ağırlık-dayanım açısından karşılaştırılması görülmektedir [3]. DP500 çift fazlı çeliğin ağırlığı DC06 malzemenin komponent ağırlığının yarısından az olmasına rağmen aynı dayanımı sağlayabilmektedir.



Şekil 2. Farklı malzemelerin ağırlık-dayanım açısından karşılaştırılması [3].

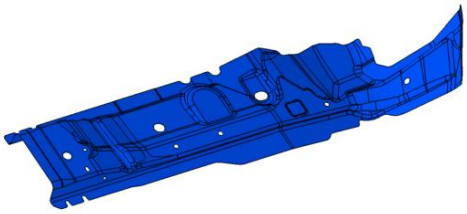
DP çelik saclar yukarıda belirtilen üstünlüklerinden dolayı otomobil üzerinde birçok yerde kullanılmaktadır. Şekil 3.a'da DP çeliklerin otomobil üzerinde kullanım yerleri ve Şekil 3.b-d'de ise DP malzeme ile üretilen yüksek mukavemet özelliği gerektiren örnek otomobil parçaları sunulmuştur.



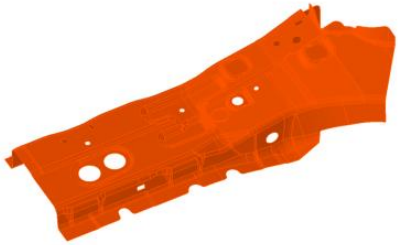
a) DP çelik sacların otomobil üzerinde kullanım yerleri (Sarı renkte)



b) Ön şase grubu destek parçası



c) Ön şase grubu parçası-I



d) Ön şase grubu parçası-II

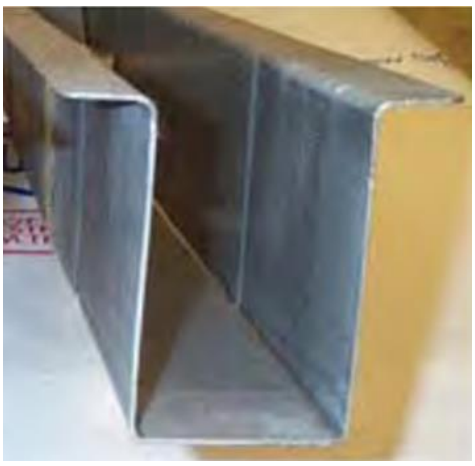
Şekil 3. Otomobil üzerinde farklı malzemelerin kullanımı ve DP çelik saclardan üretilen örnek parçalar.

DP çelikler üstün özelliklerini metalografik yapısından almaktadırlar. Bir fazın üstün özelliklerinden yararlanırken, aynı fazın istenmeyen özellikleri ise başka bir faz yardımı ile denetim altına alınmaktadır. Sert faz olan martenzit fazı gerekli dayanımı sağlarken, yumuşak faz olan ferrit fazı ise sünekliği sağlamaktadır. Böylece her iki özelliğin bir arada bulunması ile dayanım ve süneklik özelliği yüksek olan bir mikro yapı elde edilmiş olur [4-6].

Sac şekillendirme proseslerinde DP çeliklerin üstün özelliklerinin yanı sıra istenmeyen olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Şekillendirme sonrasında meydana gelecek geri esneme bu olumsuz yönlerin başında gelmektedir. Örnek bir otomobil parçasında DP çeliklerin geri esnemedeki dezavantajı Şekil 4'te gösterilmiştir. DP çelik saclarda gözlemlenen geri esneme otomotiv parçalarının üretiminde arzu edilmeyen bir kalite problemidir.



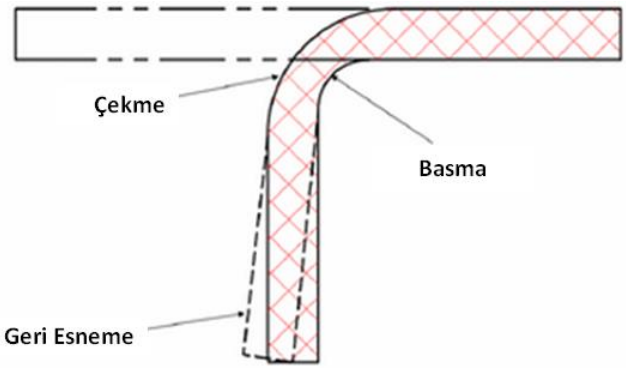
a) DP350/600 DP sac parça.



b) HSLA350/450 yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik sac parça.

Şekil 4. DP çelik sac parçalarda geri esneme.

Geri esneme, sac şekillendirme işlemi sonrasında parçada meydana gelen geometrik değişikliktir (Şekil 5). Şekillendirilen parçanın ölçüsel olarak doğruluğunu etkilemektedir ve istenmeyen bir durumdur. Geri esnemeye uğrayan parça boyutsal olarak uygun olmadığından montaj esnasında ciddi problemlere neden olmaktadır. Geri esnemeyi etkileyen parametrelerin başında malzemenin kimyasal bileşimi, malzemenin üretim yönteminden gelen metalürjik özellikleri, şekillendirme elemanları, sac kalınlığı (T), büküm yarıçapı (R) ve malzeme sıcaklığı gelmektedir [6]. Geri esnemenin önlenmesinde bu parametreler üzerinden değişikliğe gidilmektedir ve geri esneme miktarı minimize edilmektedir.



Şekil 5. Geri esnemenin şematik gösterimi [7].

Otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanı olan bu çeliklerde geri esneme üzerine yapılan çalışmalar önemi korumakta ve devam etmektedir. Bunlardan biri de Souza ve Rolfe'nin yaptığı çalışmadır. Souza ve Rolfe yüksek mukavemetli sac malzemenin form verme kalıbında farklı flanş açıları, kalıp radyüsü ve sürtünme katsayılarında şekillendirilmesinde sac malzemede meydana gelen esnemeyi deneysel olarak araştırmışlardır. Kontrol parametreleri olarak flanş açısı, büküm yarıçapı, sürtünme katsayısı seçilmiş ve kontrol parametrelerinin geri esneme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda punch radyüsünün artmasına bağlı olarak flanş açısının arttığı, kalıp radyüsünün artmasına bağlı olarak ise flanş açısının azaldığı görülmüştür. Ayrıca sürtünme katsayısının artmasıyla flanş açısının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır [8]. Başka bir çalışmada Ozturk ve diğerleri farklı kalınlıklardaki DP600 malzemesinin sıcaklık değişimiyle beraber r_0, r_{45} ve r_{90}'daki geri esnemelerini analiz etmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda sıcaklık artışıyla birlikte malzemenin şekillenebilirliğinin ve geri esnemesinin azaldığı tespit edilmiştir. Yine malzemenin farklı sıcaklıklarda ve farklı yönlerde kompleks davranışlar sergilediği de görülmüştür [2]. Sharad ve Nandedkar tarafından yapılan çalışmada iki farklı malzeme (IS513D ve DP600-HDG için farklı kalıp yarıçapı (R), sac kalınlığı (T), yarıçap/kalınlık oranı (R/T) ve mukavemet katsayısına bağlı olarak geri esneme FEA kullanılarak tahmin edilmiş ve yapay sinir ağı FEA'dan elde

edilen geri esnemeyi eşleştirmek için kullanılmıştır [9]. Yapay sinir ağı ile FEA simülasyonları karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar yakın bulunmuştur. Tisza ve Lukács tarafından yüksek mukavemetli DP çelik malzemelerin geri esneme davranışlarını deneysel ve nümerik olarak araştırılmış ve ölçülen bazı değerler farklı nümerik simülasyonlarla değerlendirilerek bu değerlerin geri esnemeyi ne şekilde etkilediği belirlenmiştir. Bu parametrelerden bazılarının (γ ve K malzeme parametreleri) geri esnemeyi anlamlı bir şekilde etkilediği tespit edilmiştir [10]. Bashah ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada giriş parametrelerinin otomotiv gözdesinde kullanılan yüksek dayanımlı malzemelerin geri esnemesi üzerindeki etkisi istatistiksel çoklu regresyon analizi kullanılarak belirlenmiş ve bu malzemelerin geri esnemesi tahminsel olarak modellenmiştir. Ölçülen ve tahmin edilen geri esneme hataları endüstriyel açıdan kabul edilebilir minimal düzeyde elde edilmiştir [11]. Toros ve diğerleri ileri yüksek dayanımlı TRIP800 çeliğinin şekillendirilebilmesini ve geri esneme karakterizasyonunu Hill-48, Barlat-89 ve YLD2000 gibi farklı malzeme modellerini kullanarak FEA ile araştırmışlardır. Çalışmada, YLD2000-2d V kalıp bükme işlemleri FEA simülasyonu en iyi geri esneme tahmin yeteneğine sahip olmuştur [12]. Sac metallerin şekillendirme özellikleri ve geri esnemesinin araştırılması üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde oldukça güçlü bir metot olmasından dolayı FEA'nın [13-19], Taguchi metodunun [19] ve regresyon analizinin [11] tercih edildiği görülmektedir.

Otomotiv gövdelerini oluşturan farklı bölgeler için farklı kalınlıklarına sahip DP çelik sac malzemeler kullanılmakta olup bu sac malzemelerin kalıpta bükülmesinden sonra oluşan en büyük problem geri esnemedir. Kalıpta bükme işlemi sonucunda üretilen parçanın geri esneme miktarını etkileyen en önemli parametre ise büküm radyüsü/yarıçapı (R) olup sac kalınlığına (T) bağlı olarak geri esneme farklılık göstermektedir. Bu çalışmada, çift fazlı DP 600 çelik sac malzemenin bükülmesinde oluşan geri esnemenin optimize edilebilmesi amacıyla farklı sac kalınlıklarına bağlı büküm radyüslerinin tespiti ve optimizasyonu FEA ile yapılmıştır. Çalışmada FEA yöntemiyle çalışan Autoform analiz programı kullanılmış ve seçilen bu analiz yöntemi ile çözüm basite indirgenerek kısmi çözümlerle sonuca ulaşılmıştır. Çalışma sonucunda farklı kalınlıklara bağlı büküm radyüslerinin tespitiyle DP çelik sac parçalardaki geri esneme tasarım aşamasında optimize edilmiştir. Böylece zaman, maliyet ve işçilik açısından önemli kazanımlar sağlanmıştır.

2. MALZEME VE METOT

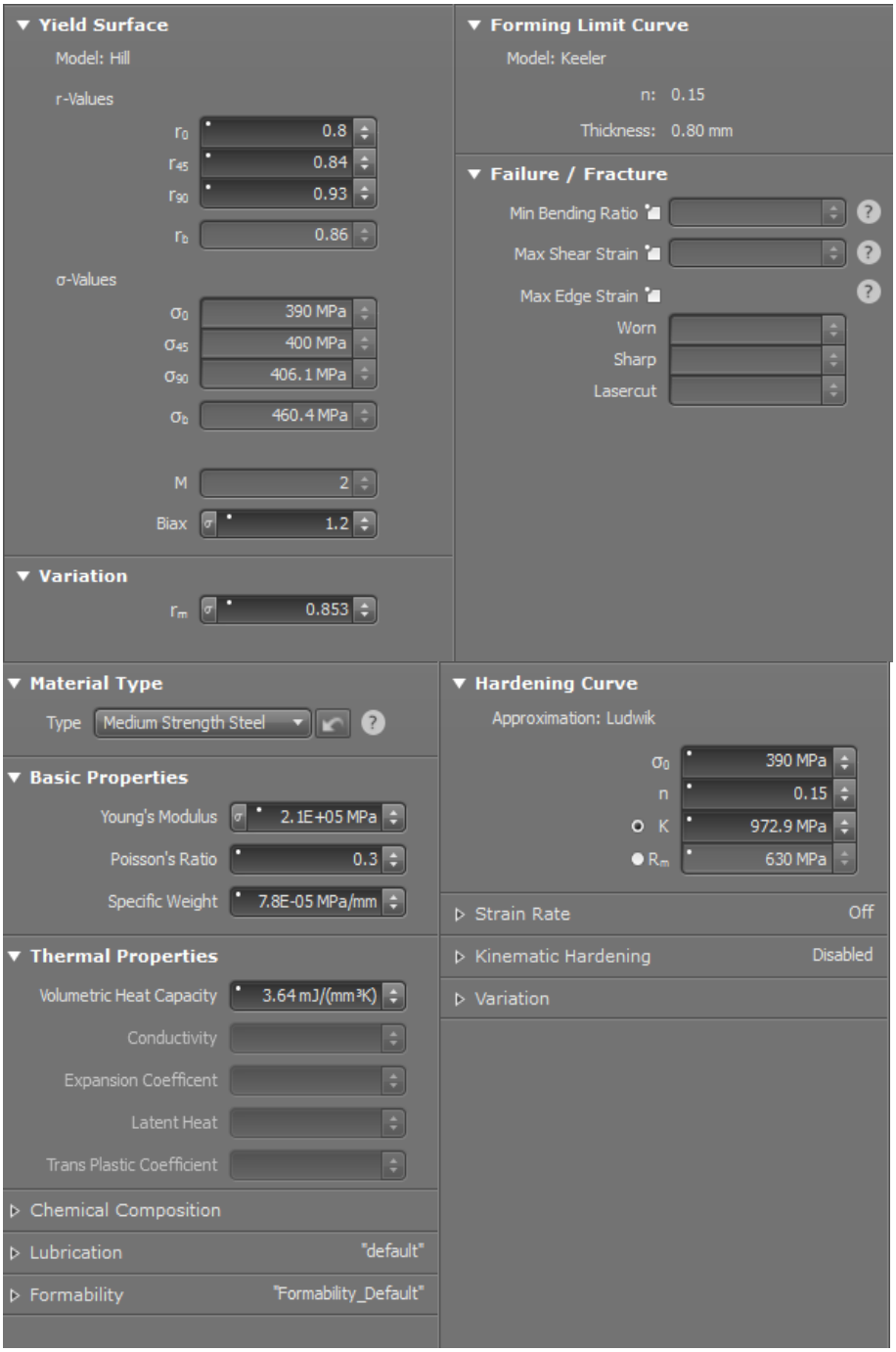
2.1. Malzeme

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde oldukça sık kullanılan DP600 çift fazlı çelik sac malzeme kullanılmıştır. Kapı panelleri, şase parçaları gibi presle biçimlendirilen otomobil parçaları ve bazı bağlantı elemanları yapımında kullanılan bu DP çelikler, çeliklerin demir karbon (Fe-C) denge diyagramında ferrit-östenit bölgesinde herhangi bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, bir süre tutulması ve ardından yüksek hızla soğutularak östenitin martenzite dönüşümüyle elde edilir. DP600 çeliğinin yapısında bulunan ferrit fazı yüksek sünekliği, martenzit fazı ise yüksek mukavemeti sağlamaktadır. DP600 sac malzemesinin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur [20].

Tablo 1. DP600 sac malzemenin kimyasal birleşimi (% Hacim) ve fiziksel özellikleri [20].

Kimyasal Bileşimi (% hacim)									Mekaniksel Özellikler			
C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	Nb	Cr	Re N/mm^2 min.	Rm N/mm^2 min.	A (%)	
											d<3 A_{80} min.	d≥3 A_5 min.
max	max	max	max	max	max	max	max	max				
0.14	0.50	2,5	0.10	0.015	0.22	0.015	0.09	1.0	300-400	400 min.	23	
Re: Akma mukavemeti, Rm: Çekme mukavemeti, A: Uzama (%)												

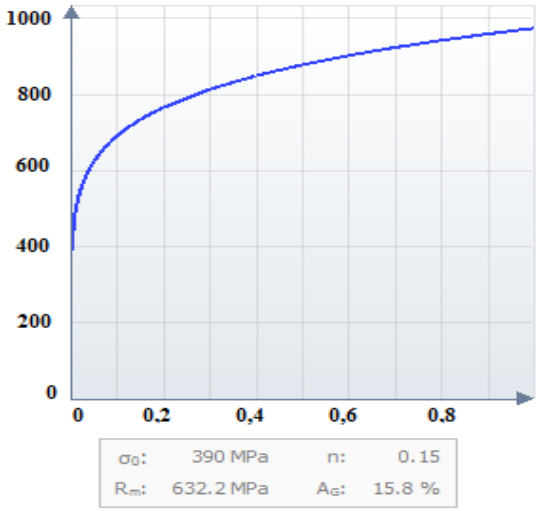
Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan DP600 malzemesine ait Şekil 6'da sunulan değerler kullanılmıştır [20]. Bu şekilden de görüleceği üzere DP600 malzemenin hadde yönüne bağlı değerleri (incelmeye karşı gösterdiği direnç); r_0=0.8, r_{45}=0.84, r_{90}=0.93 ve ortalama değer olan $r_m=(r_0+2r_{45}+r_{90})/4$' ten r_m=0.853, elastisite modülü $2.1x10^5$ Mpa ($2.1x10^{11}$ N/m^2), poisson oranı 0.3, özgül ağırlığı $7.8x10^{-5}$ Mpa/mm, akma dayanımı (σ_0) 390 Mpa ve çekme dayanımı (R_m) 630 Mpa'dır.



Şekil 6. DP600 sac malzemesinin mekanik özelliklerine ait sayısal değerler [20].

DP600 sac malzeme sürekli akma özelliği gösterdiği için şekillendirilen parçaların yüzeyleri çok düzgün olmaktadır. Akma mukavemetinin düşük olması plastik deformasyonda az bir kuvvetle şekillendirilebilirliği sağlamaktadır. Şekillendirilen parçaların tekrar şekillendirilmesinde aşırı kuvvetler gerekmemektedir [20].

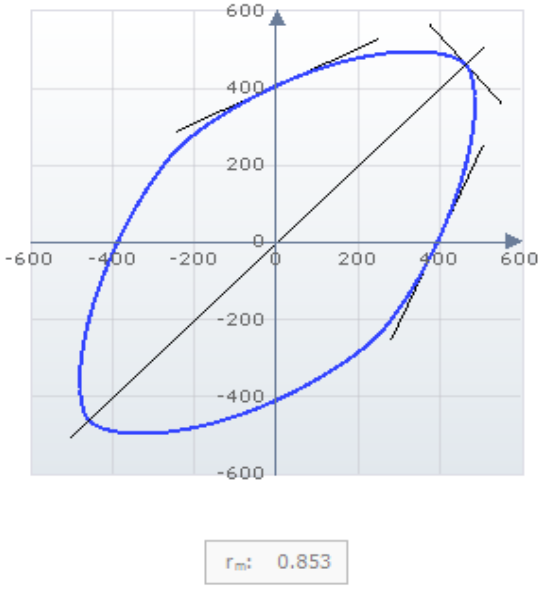
Şekil 7'de DP600 malzemesine ait sertleştirme eğrisi sunulmuştur. Şekillendirme sırasında sac metal malzeme uzadıkça akma gerilmesinin artmasını (pekleşme) veren eğridir. Metalin soğuk kalıcı şekillendirmesinde malzeme içyapısında oluşan dislokasyonlar ve değişiklikler şekillenmiş malzemenin akma gerilmesini arttırmaktadır, yani malzeme şekillenme ile mukavemet kazanmaktadır. Çekmede gerdirme yapılan bölgelerin mukavemet kazanması bu nedenden dolayıdır. Bu değişim, sac şekillendirmede oldukça önemli ve elde edilen sonuca direkt etkili olduğundan malzeme parametreleri içinde sertleşme (pekleşme) eğrisi olarak alınmaktadır. Pekleşme, akma yüzeyi ve şekillendirme sınır eğrileri malzeme kompozisyonuna (C ve diğer alaşım bileşenleri) bağlı olmakla birlikte pratikte eğrinin kendisi malzeme içeriğinden değil testlerle elde edilmektedir. Örneğin; farklı içerikteki alaşımlar aynı (veya yakın) mekanik sonuçlar verebilmektedir, bileşenlerin mekanik sonuçlara etkisiyle eğrilere ulaşmak kolayca mümkün olmamaktadır [21].



σ_0:Akma mukavemeti
R_m:Çekme mukavemeti
n:Gerinim sertleşmesi katsayısı
A_G:Uniform uzama

Şekil 7. DP600 sac malzemeye ait sertleşme eğrisi [21].

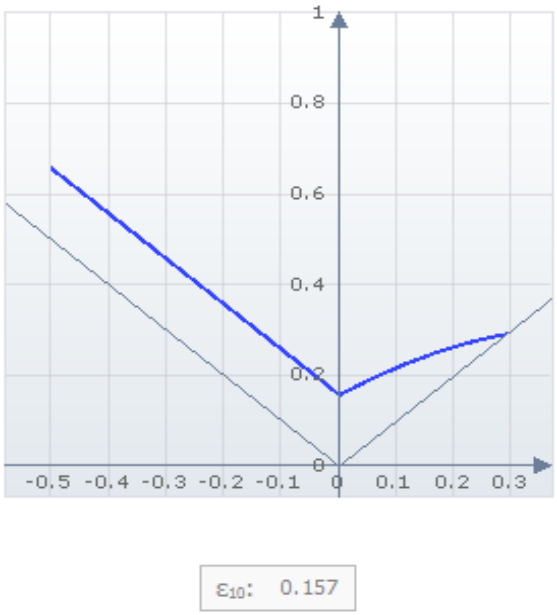
Şekil 8'de sunulan DP600 malzemesine ait akma yüzeyi adlı ikinci eğri, akma gerilmesinin yöne bağlı (sac üzerinde 0°, 45°, 90°) değişimini vermektedir. Pekleşme eğrisi akma gerilmesinin 0° (hadde yönü) doğrultusunda oransal uzama ile değişimini verir. Fakat bu eğri sac malzemede sabit olmayıp yöne bağlı değişmektedir, metalin kristal yapısından dolayı yöne bağlılık 'anizotropi' oluşmaktadır. İkinci eğri olan akma eğrisi bu değişimi vermektedir, genellikle elips veya altıgenin yuvarlatılmış köşeli hali gibidir. Bu eğri anizotropi katsayıları ile akma modeli denilen karmaşık denklemler üzerinden hesaplanır.



r_m: Malzemenin incelmeye karşı gösterdiği direncin, hadde yönüne bağlı ortalama değeri.

Şekil 8. DP600 sac malzemeye ait akma gerilmesi eğrisi [21].

Şekil 9'da DP600 malzemesine ait şekillendirme limit eğrisi sunulmuştur. Şekillendirme limit eğrisi sacda, kalınlık hariç, yüzeydeki iki yönlü oransal uzama değerlerinin birbirine bağımlı olarak kopma durumunu gösterdiği eğridir.



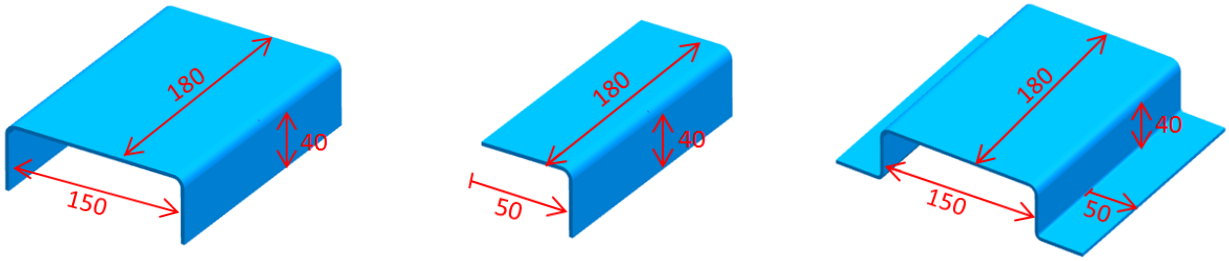
ε_{10}: minimum gerinme değeri

Şekil 9. DP600 sac malzemeye ait şekillendirme limit eğrisi [21].

ε_{10} değeri, malzeme kataloglarına geçen minimum oransal plastik uzama veya minimum gerinme değeridir. Bu değer 100 ile çarpılarak yüzde uzama değeri şeklinde okunmaktadır. Kullanılan malzemeye ait ε_{10} değeri 0.157'dir ve bu da %15.7 uzama anlamına gelmektedir. Sac malzeme bu değeri geçtiğinde kopma eğilimindedir.

2.2. Metot

Şekillendirme sonrasında oluşan geri esnemeyi optimize edebilmek amacıyla otomotivde en çok karşılaşılan U tipi (Şekil 10.a), L tipi (Şekil 10.b) ve Hood tipi parça profili (Şekil 10.c) analiz edilmiştir. Çalışmalar AUTOFORM 5.2 programında Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile gerçekleştirilmiştir. Programda şekillendirme için gerekli kalıp elemanları başka bir CAD programında oluşturularak programa dâhil edilmiştir. Modelleme sac metal kabuk elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz işlemlerinde çok sayıda iterasyon ile çözüme yaklaşım sağlanmıştır.



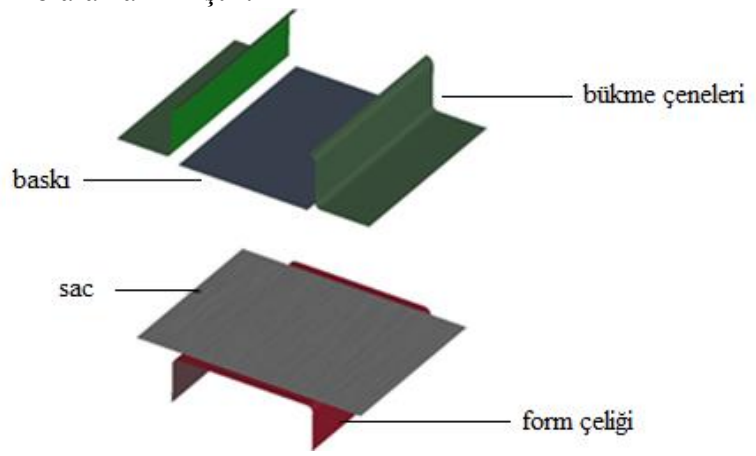
a) U tipi profil b) L tipi profil c) Hood tipi profil

Şekil 10. Geri esnemeyi optimize etmek için seçilen profil geometrileri ve ölçüleri.

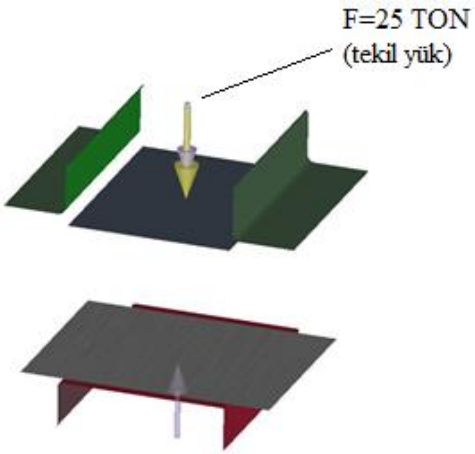
Şekil 10'da geometrisi ve boyut ölçüleri verilen her profilin 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0, 2.4 ve 2.8 mm sac kalınlıklarına (T) göre geri esneme durumları karşılaştırılmıştır.

U tipi parça profili için Şekil 11'de şematik olarak gösterilen büküm metodu kullanılmıştır. Aynı şekil üzerinde kalıp elemanları da gösterilmektedir. Proses, üst baskının aşağı yönlü hareket etmesiyle sac malzemenin, baskı ve form çeliği arasında sıkıştırılması ve daha sonra yukarıdan aşağıya inen bükme

çenelerinin sıkıştırılan sac malzemeyi bükmesi şeklinde gerçekleşir. Gerinim sertleşme katsayısı 0.15'tir Bu katsayının düşük olması malzemenin fazla pekleşmeden kopacağını belirtmektedir. Baskı kuvveti 25 ton verilmiştir. Baskının bükme işlemini gerçekleştirebilmesi için 25 ton yeterli görülmüştür. Baskı kuvveti her üç parça profili için de tekil kuvvet olarak etki etmektedir (Şekil 12). Sac malzemenin boyutları 180 mm x 240 mm olarak alınmıştır.

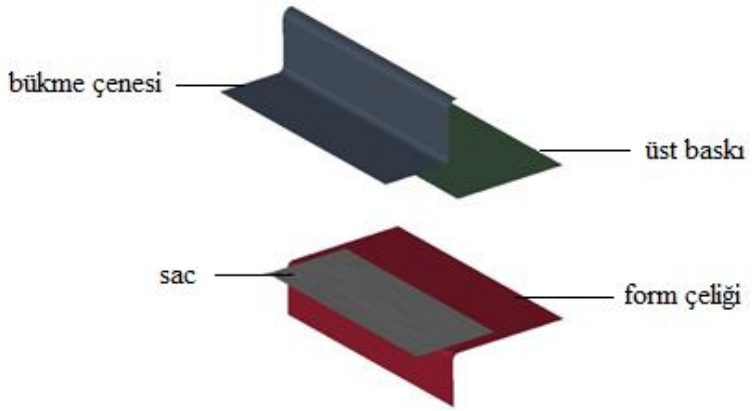


Şekil 11. U tipi profil için büküm metodu ve kalıp elemanları.



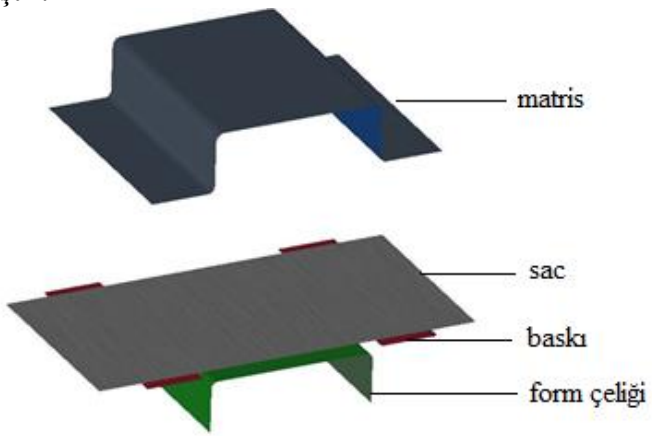
Şekil 12. Baskı kuvvetinin uygulanması.

L tipi profil parçalar için Şekil 13'te gösterilen büküm metodu uygulanmıştır. Proses U tipi parça şekillendirilmesinde olduğu gibidir. Analizlerde gerinim sertleşme katsayısı 0.15 ve baskı kuvveti 25 ton olarak verilmiştir. Sac malzemenin boyutları 70 mm x180 mm olarak alınmıştır.



Şekil 13. L tipi profil için büküm metodu ve kalıp elemanları.

Hood tipi profil parçalar için de Şekil 14'te sunulan büküm metodu uygulanarak analiz gerçekleştirilmiştir. Büküm işlemi, matris elemanının aşağı yönlü hareketiyle sac malzemenin matris ve baskı arasında sıkışması ve daha sonra matris ve baskı elemanının birlikte aşağı yönlü hareket etmesiyle sıkışan sac malzemenin form çeliğinin formunu alması şeklinde gerçekleşmektedir. Analizlerde yine gerinim sertleşme katsayısı 0.15 ve baskı kuvveti 25 ton olarak verilmiştir. Sac malzemenin boyutları 70 mm x180 mm olarak alınmıştır.



Şekil 14. Hood tipi profil için kalıp elemanları.

3. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

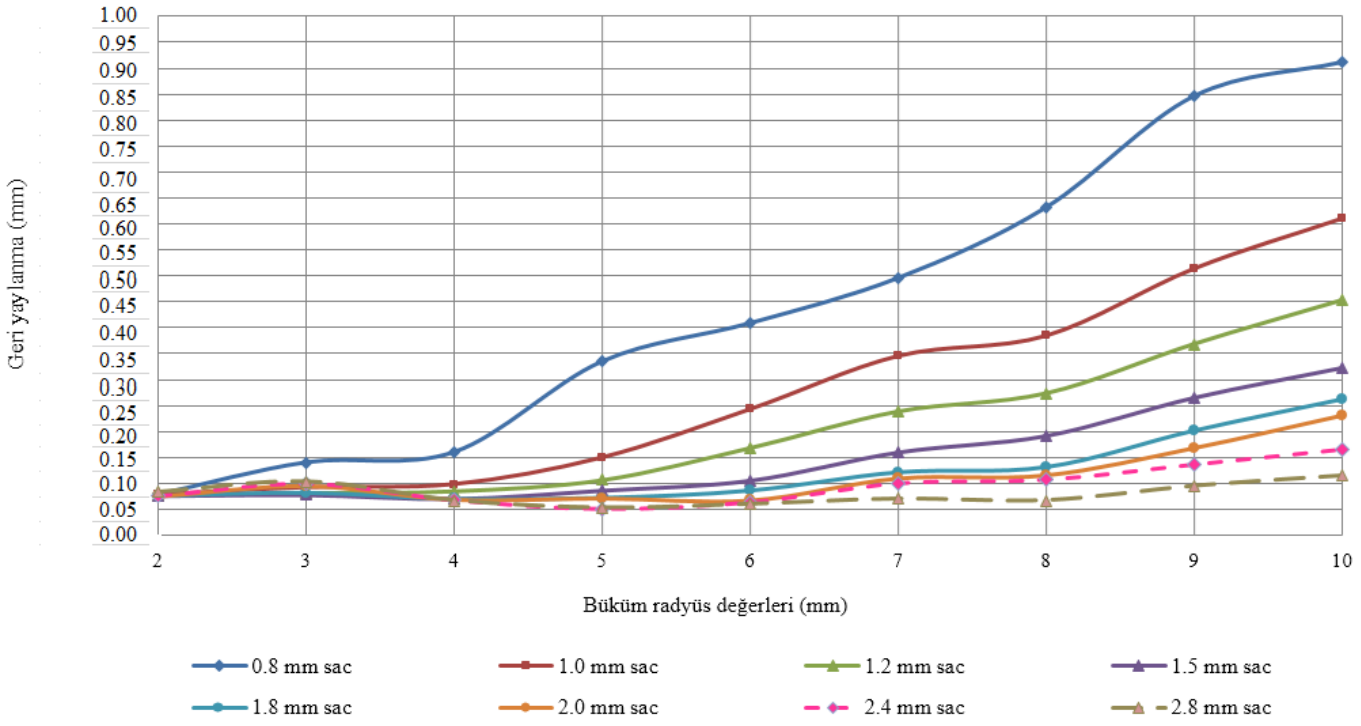
CAD programında çizilen kalıp elemanlarının sonlu elemanlar yönteminin uygulandığı simülasyon programında tanıtılması ve işlem için gerekli parametrelerin (pres kuvveti, sürtünme katsayısı, sac boyutları vb.) girilmesiyle analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı sac kalınlıkları ve büküm radyüsleri için bu işlem tekrar edilerek sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon çözümleri gerçekleştirildikten sonra Tablo 2'de sunulan geri esneme değerleri elde edilmiştir.

Tablo 2. U, L ve Hood tipi profil için sac kalınlığına ve büküm radyüslerine bağlı geri esneme değerleri.

U Tipi Profil		Büküm Radyüsleri (R, mm)								
		R=2	R=3	R=4	R=5	R=6	R=7	R=8	R=9	R=10
Sac Kalınlığı (T, mm)	0.8	0.078	0.14	0.16	0.33	0.41	0.49	0.63	0.84	0.97
	1.0	0.078	0.092	0.098	0.15	0.24	0.34	0.38	0.51	0.61
	1.2	0.077	0.082	0.085	0.107	0.16	0.24	0.27	0.37	0.45
	1.5	0.076	0.078	0.071	0.087	0.106	0.16	0.19	0.26	0.32
	1.8	0.076	0.082	0.07	0.072	0.086	0.122	0.132	0.2	0.26
	2.0	0.075	0.095	0.069	0.072	0.068	0.11	0.116	0.169	0.23
	2.4	0.076	0.099	0.068	0.051	0.064	0.1	0.107	0.136	0.16
	2.8	0.083	0.104	0.067	0.053	0.06	0.07	0.067	0.095	0.14
L Tipi Profil		Büküm Radyüsleri (R, mm)								
		R=2	R=3	R=4	R=5	R=6	R=7	R=8	R=9	R=10
Sac Kalınlığı (T, mm)	0.8	0.135	0.225	0.195	0.35	0.45	0.47	0.573	0.665	0.91
	1.0	0.105	0.17	0.135	0.27	0.34	0.34	0.38	0.462	0.61
	1.2	0.07	0.1	0.115	0.17	0.22	0.3	0.319	0.4	0.45
	1.5	0.065	0.089	0.095	0.089	0.144	0.146	0.208	0.215	0.32
	1.8	0.05	0.089	0.063	0.091	0.112	0.123	0.155	0.168	0.26
	2.0	0.055	0.089	0.057	0.09	0.09	0.119	0.135	0.162	0.23
	2.4	0.06	0.089	0.07	0.086	0.075	0.095	0.098	0.131	0.16
	2.8	0.065	0.087	0.084	0.084	0.08	0.093	0.093	0.092	0.09
Hood Tipi Profil		Büküm Radyüsleri (R, mm)								
		R=2	R=3	R=4	R=5	R=6	R=7	R=8	R=9	R=10
Sac Kalınlığı (T, mm)	0.8	5.20	5.85	5.9	5.8	5.8	6.1	6.55	6.75	7.3
	1.0	4.45	4.95	4.85	4.8	4.9	5.4	6.05	6.3	6.75
	1.2	3.6	4.3	4.35	4.19	4.4	4.85	5.5	5.85	6.5
	1.5	2.6	3.25	3.15	3.39	4.0	4.3	4.8	5.3	5.9
	1.8	2.15	2.55	2.6	2.4	2.75	3.3	4.1	4.5	5.5
	2.0	1.6	2.15	2.1	1.7	2.15	2.6	3.4	3.75	4.5
	2.4	1.3	1.45	1.4	0.85	0.9	1.3	1.6	1.85	2.75

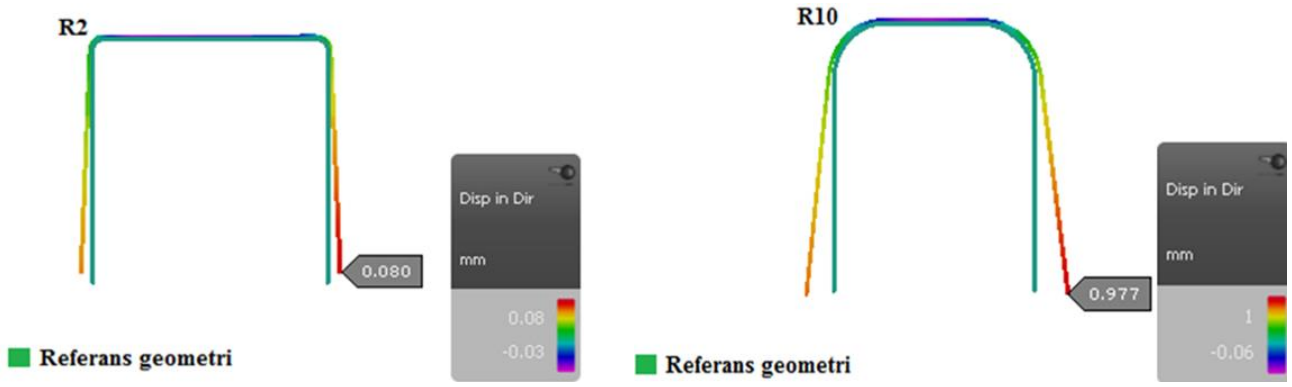
3.1. U Tipi Profil İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Sonuçları

Şekil 16'da U tipi profil parçaların bükülme işlemi sonrasında meydana gelen geri esneme değerlerinin büküm radyüslerine ve sac kalınlıklarına bağlı değişimi sunulmuştur. Bu şekilde de görüleceği üzere; büküm radyüslerinin artmasına bağlı olarak geri esneme artmaktadır. Şekil 16' ya bakıldığında T=1.0 mm sac kalınlığındaki analiz sonuçlarında görülmektedir ki; R=2 mm büküm radyüsü ile gerçekleştirilen simülasyon sonucu geri esneme, R=10 mm büküm radyüsü ile gerçekleştirilen simülasyon sonucu oluşan geri esnemenin yaklaşık 1/6'sı oranındadır. Şekilden ayrıca sac kalınlığının artmasına paralel olarak geri esnemenin de azaldığı görülmektedir. Buna göre en az geri esnemenin küçük büküm radyüslerinde ve büyük sac kalınlıklarında oluştuğu görülmektedir. Ancak, tasarım aşamasında minimum sac kalınlığı ile istenen mukavemet şartlarının sağlanması amaçlandığı göz önünde bulundurulduğunda büyük sac kalınlıklarında çalışmak ek maliyet getirecek, ayrıca otomotiv endüstrisinde amaçlanan araç ağırlığının düşürülmesini olumsuz etkileyecektir.



Şekil 16. U tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığına bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

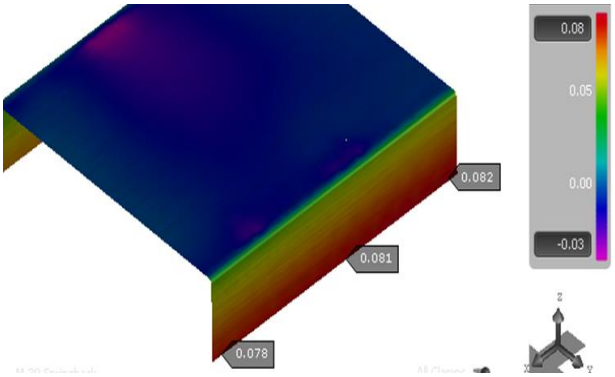
U tipi profilin bükülmesinde T=0.8 mm sac kalınlığı için büküm radyüsünün başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 17'de görülmektedir. Bu şekilde de görüleceği üzere; aynı sac kalınlığına sahip malzemenin büküm yarıçapının R=2 mm'den R=10 mm'ye arttırılmasıyla şekillendirme sonunda geri esnemenin arttığı görülmektedir.



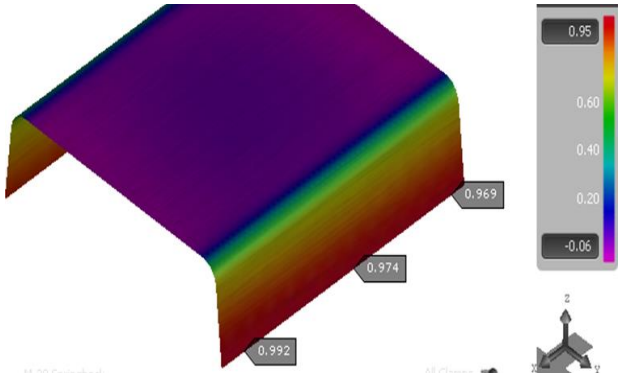
a) Büküm yarıçapı R=2 mm b) Büküm yarıçapı R=10 mm

Şekil 17. U tipi profilin bükülmesinde T=0.8 mm sac kalınlığı için büküm radyüsünün başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

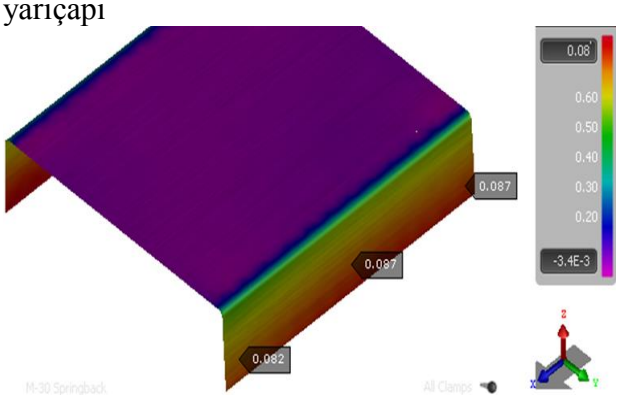
U tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığının başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 18'de gösterilmektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere optimum geri esneme sac kalınlığının büyük ve büküm yarıçapının küçük olduğu analizde elde edilmiştir (Şekil 18.c).



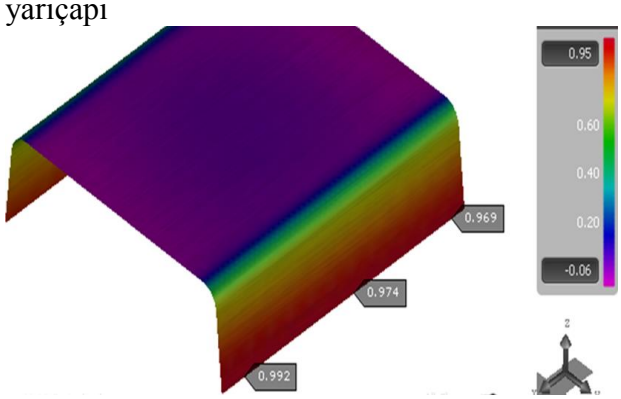
a) T=0.8 mm sac kalınlığı, R=2 mm büküm yarıçapı



b) T=0.8 mm sac kalınlığı, R=10 mm büküm yarıçapı



c) T=2.8 mm sac kalınlığı, R=2 mm büküm yarıçapı

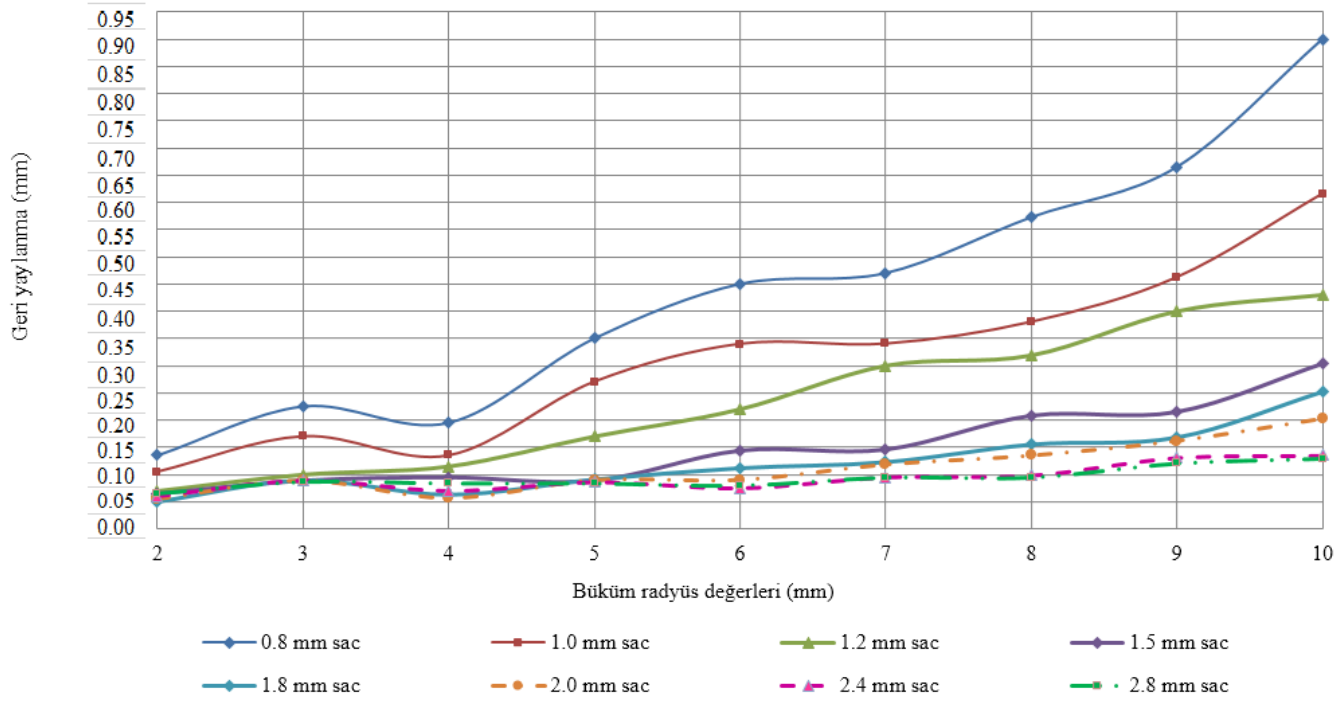


d) T=2.8 mm sac kalınlığı, R=10 mm büküm yarıçapı

Şekil 18. U tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığının başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

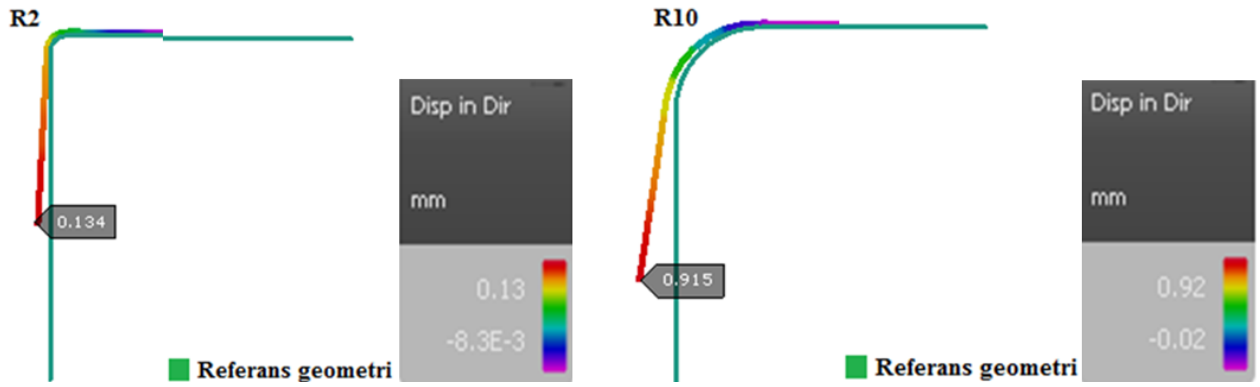
3.2. L Tipi Profil İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Sonuçları

Şekil 19'daki grafikte L tipi profil parçaların bükülme işlemi sonrasında meydana gelen geri esneme değerlerinin büküm radyüslerine ve sac kalınlıklarına bağlı değişimi sunulmuştur. Şekil incelendiğinde aynı sac kalınlığına sahip L tipi profil parçalarının büküm yarıçaplarının artmasıyla geri esnemenin arttığı görülmektedir. Özellikle ince sacların şekillendirilmesi sonrasında oluşan geri esneme üzerinde büküm radyüslerinin etkisi daha büyüktür. T=0.8 mm sac kalınlığındaki L tipi profil analizlerinde, R=2 ile R=10 mm büküm radyüslerinin şekillendirme sonrası geri esneme değerleri arasındaki oran yaklaşık 7 kat iken, T=2.8 mm sac kalınlığındaki L tipi profillerin analizlerinde, R=2 ile R=10 mm büküm radyüslerinin şekillendirme sonu geri esneme değerleri arasındaki oran 1.5-2 kat arasındadır. Buradan sac kalınlığının artması ile geri esnemenin azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 19. L tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığına bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

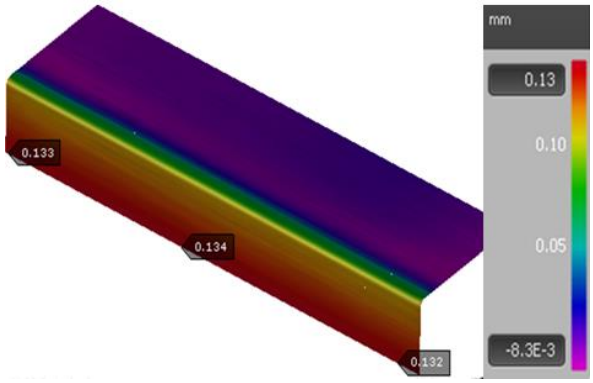
L tipi profilin bükülmesinde T=0.8 mm sac kalınlığı için büküm radyüsünün başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 20'de sunulmuştur. Bu şekilden; aynı sac kalınlığına sahip malzemenin büküm yarıçapının R=2 mm'den R=10 mm'ye arttırılmasıyla şekillendirme sonunda geri esnemenin de arttığı (Yer değiştirme 0.134'den 0.915'e artmaktadır.) görülmektedir.



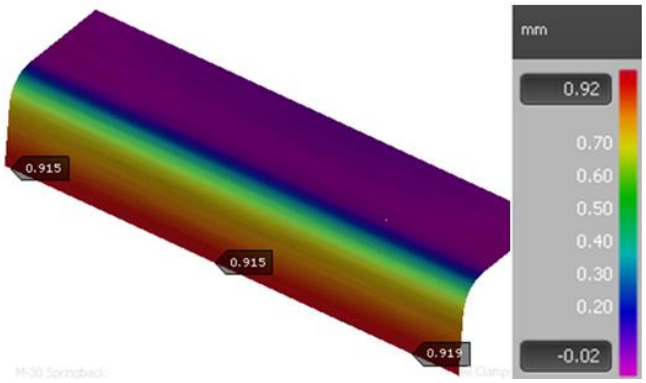
a) Büküm yarıçapı R=2 mm b) Büküm yarıçapı R=10 mm

Şekil 20. L tipi profilin bükülmesinde 0.8 mm sac kalınlığı için büküm radyüsünün başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

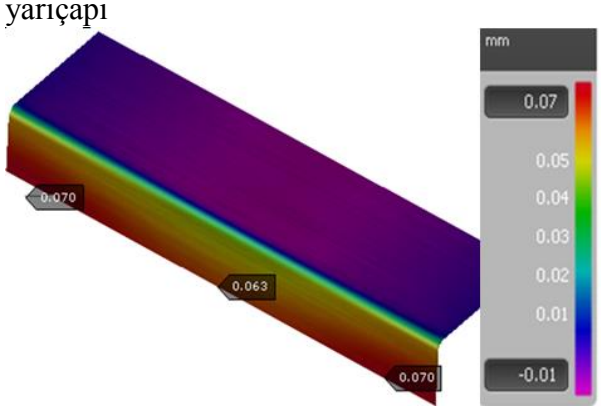
L tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığının başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 21'de gösterilmektedir. L tipi profilin bükülmesinde optimum geri esneme sac kalınlığının büyük (T=2.8 mm) ve büküm yarıçapının küçük (R=2 mm) olduğu değerlerde elde edilmiştir (Şekil 21.c).



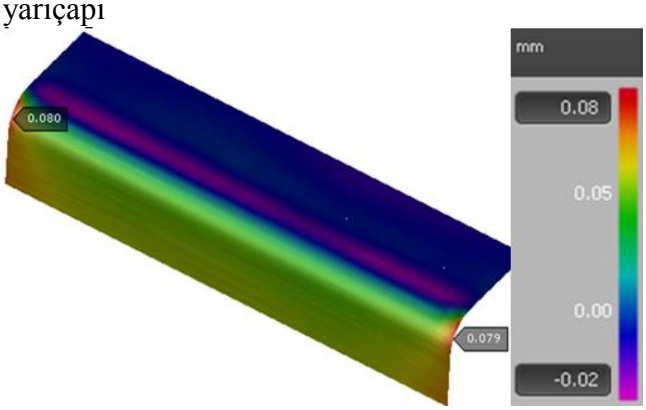
a) T=0.8 mm sac kalınlığı, R=2 mm büküm yarıçapı



b) T=0.8 mm sac kalınlığı, R=10 mm büküm yarıçapı



c) T=2.8 mm sac kalınlığı, R=2 mm büküm yarıçapı

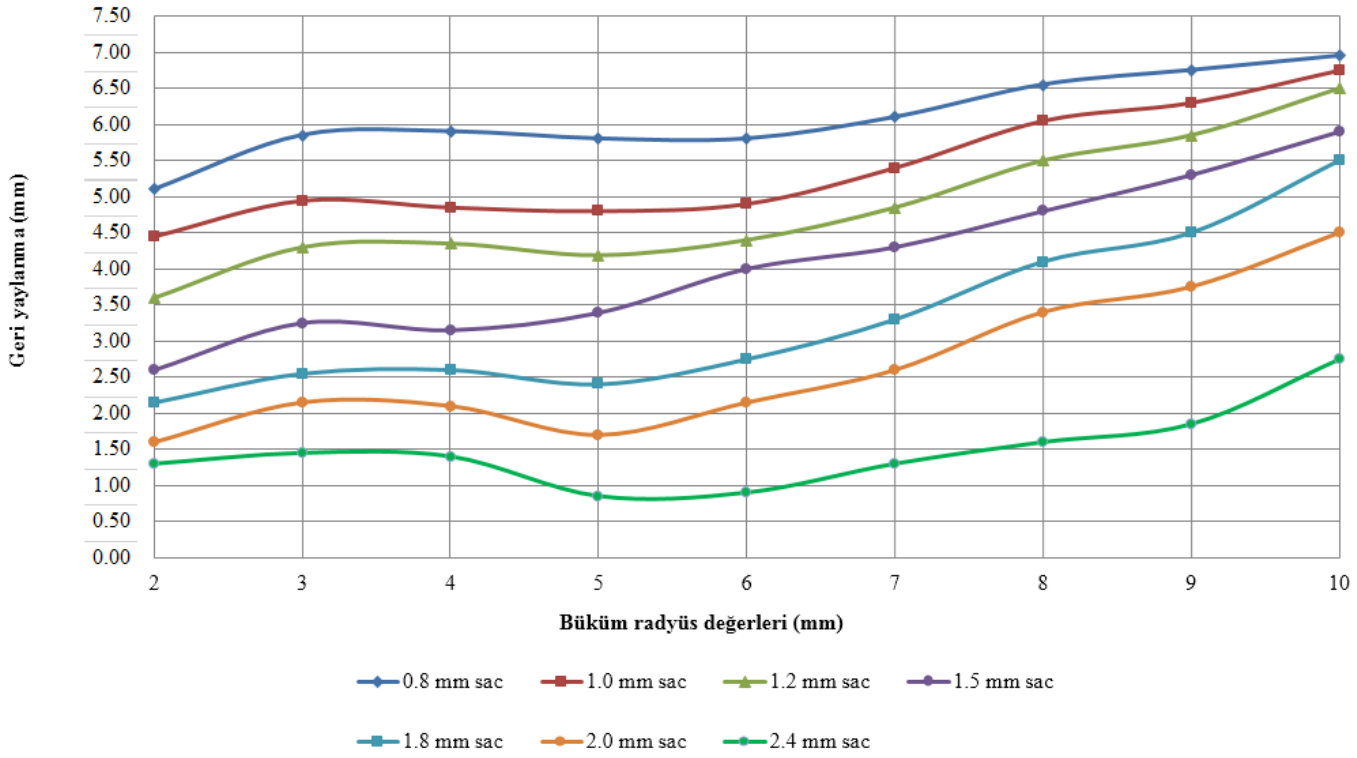


d) T=2.8 mm sac kalınlığı, R=10 mm büküm yarıçapı

Şekil 21. L tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığının başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

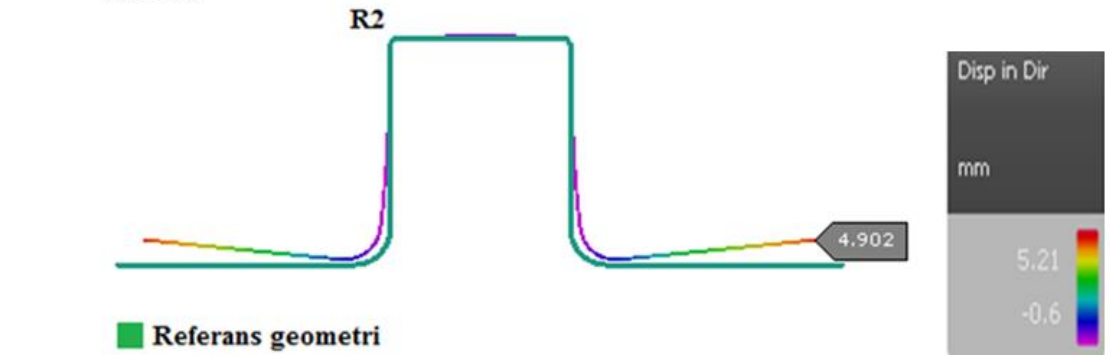
3.3. Hood Tipi Profil İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi Analiz Sonuçları

Şekil 22'deki grafikte de Hood tipi profil parçaların bükülme işlemi sonrasında meydana gelen geri esneme değerlerinin büküm radyüslerine ve sac kalınlıklarına bağlı değişimi sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, farklı büküm radyüsleri ve sac kalınlıklarına bağlı olarak elde edilen şekillendirme sonu geri esneme değerlerindeki değişimler U ve L tipi profillerinde ortaya çıkan durumla aynıdır. Genel olarak, büküm radyüslerinin artmasına bağlı olarak şekillendirme sonu geri esneme artma eğilimindedir. Yine, geri esneme değerleri tüm sac malzeme kalınlıklarında da büküm radyüslerinin değişimine bağlı olarak paralel bir şekilde değişmektedir. U ve L tipi profillerin bükümünde ise sac malzemenin kalınlığının arttırılmasına bağlı olarak büküm radyüslerinin etkisi azalmaktadır.



Şekil 22. Hood tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığına bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

Hood tipi profilin bükülmesinde T=0.8 mm sac kalınlığı için büküm radyüsünün başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 23'te görülmektedir. Şekil incelendiğinde büküm radyüsünün R=2 mm'den R=10 mm'ye arttırılması ile geri esneme değeri 4.902 mm'den 7.032 mm'ye yükselmiştir. Yaklaşık olarak iki kata yakın bir artış söz konusudur. Hood tipi şekillendirmede küçük büküm radyüsünün tasarıma uygulanmasının önemi bu şekilden görülebilmektedir.



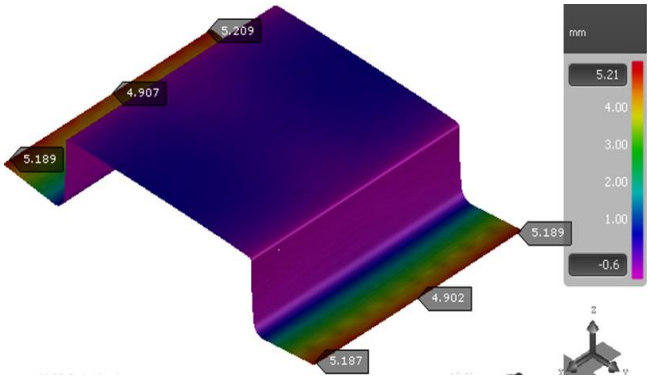
a) Büküm yarıçapı R=2 mm



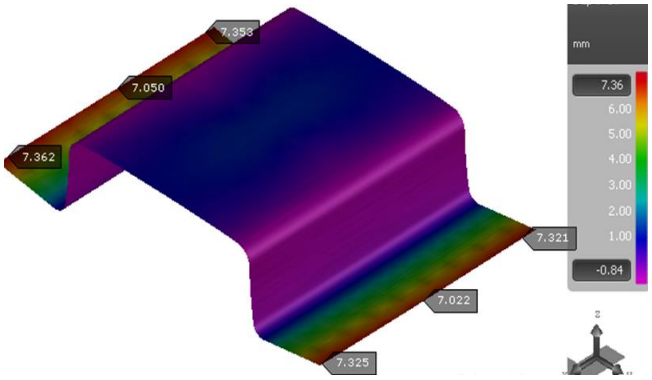
b) Büküm yarıçapı R=10 mm

Şekil 23. Hood tipi profilin bükülmesinde 0.8 mm sac kalınlığı için büküm radyüsünün başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

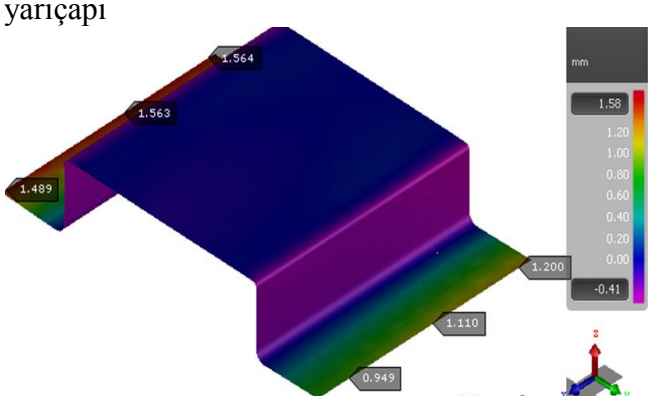
Hood tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığının başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 24'de gösterilmektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere optimum geri esneme sac kalınlığının büyük (T=2.8 mm) ve büküm yarıçapının küçük (R=2 mm) olduğu analizde elde edilmiştir (Şekil 24.c).



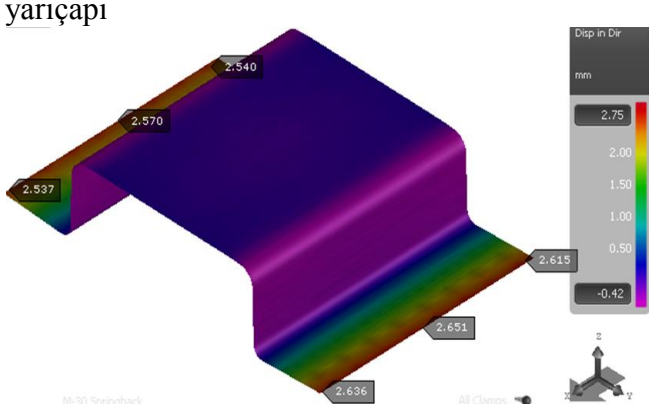
a) T=0.8 mm sac kalınlığı, R=2 mm büküm yarıçapı



b) T=0.8 mm sac kalınlığı, R=10 mm büküm yarıçapı



c) T=2.8 mm sac kalınlığı, R=2 mm büküm yarıçapı



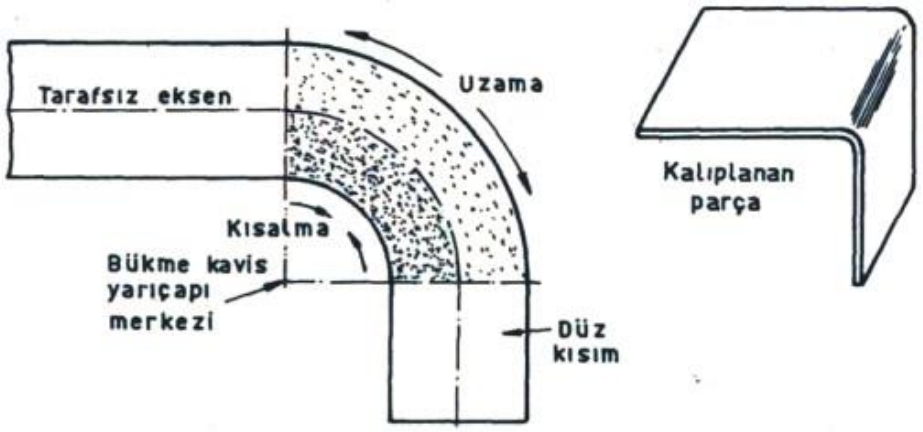
d) T=2.8 mm sac kalınlığı, R=10 mm büküm yarıçapı

Şekil 24. Hood tipi profilin bükülmesinde büküm radyüsü ve sac malzeme kalınlığının başlangıç ve son değerlerine bağlı olarak geri esneme değerlerinin karşılaştırılması.

3.4. Büküm Yarıçapına ve Sac Kalınlığına Bağlı Olarak Geri Esnemenin Değişim Nedenleri

Bu çalışmada gerçekleştirilen FEA analizlerinde de görüldüğü DP600 sac malzemenin üç farklı profilde bükülmesi sonrasında oluşan geri esneme üzerinde etkili parametrelerin başında büküm yarıçapı (R) ve sac kalınlığı (T) gelmektedir. Geri esnemenin R'ye ve T'ye göre değişim nedenleri şu şekilde açıklanabilir. Bükme işleminde sac metal malzeme moment etkisi altında şekillendirilmektedir. Moment etkimesiyle DP600 sac malzemenin iç yüzeyi basmaya, dış yüzeyi çekmeye zorlanır. Malzeme içyapısında oluşan dislokasyon hareketleri sonucu, malzeme akma değerine ulaşır ve bu noktadan sonra elastik şekil vermeden plastik şekil vermeye geçilmiş olur. T kalınlığındaki bir sac malzemenin bükme işlemi sırasında büküm yarıçapı R değerinin azalması sonucu, R/T değeri azalacaktır (Şekil 25) [22]. R/T değerinin azalmasına bağlı olarak ise malzeme iç yüzeyine etkiyen basma ve malzemenin dış yüzeyine etkiyen çekme gerilmeleri artmaktadır. Bundan dolayı DP600 sac malzemenin şekillendirme sonu istenilen tolerans değerleri içerisinde kalması ve geri esnemelerin minimuma indirilmesi için sac malzemeye etki eden gerilme değerlerinin yeterince büyük olması gerekmektedir. Gerilme değerlerinin

büyük olması için de R/T oranının yeterince küçük olması gerekmektedir. R/T oranı arttıkça parça geometrisinde karşılaşılan doğruluktan sapma miktarı, yani geri esneme artmaktadır [23-24].



Şekil 25. Kalıplanan parça ve tarafsız eksen [22]

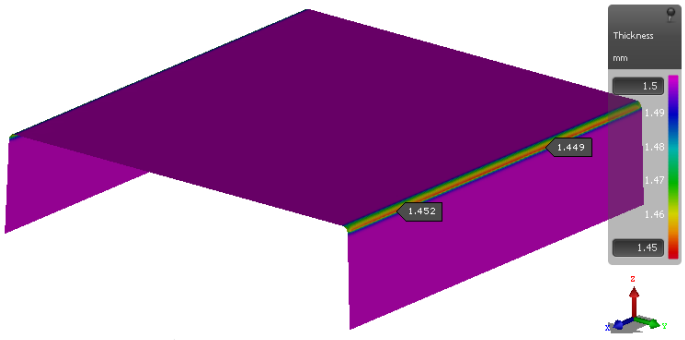
Tablo 3'te DP600 sac malzemenin U, L ve Hood tipi profillerde bükülmesine ait FEA analizlerinde elde edilen R/T oranına bağlı geri esneme değerleri sunulmuştur. Bu tabloda U, L ve Hood tipi profillerin bazı sac kalınlıkları ve büküm radyüsleri sabit tutularak R/T oranları hesaplanmıştır. Bu sac kalınlıkları ve büküm radyüslerine karşılık gelen geri esneme değerleri incelendiğinde, R/T oranının artması ile geri esnemenin de arttığı görülmektedir. Tabloda U tipi profil için aynı sac kalınlığında (T=1.2 mm), R=2 mm büküm radyüsü için R/T oranı 1.67 ve geri esneme 0.077 mm iken R=10 mm büküm radyüsü için R/T oranı 8.33 olmakta ve geri esneme yaklaşık 6 kat artarak 0.452 mm'ye ulaşmıştır. Aynı şekilde, L tipi profil için aynı büküm radyüsünde (R=4mm), T=2.8 mm sac kalınlığı için R/T oranı 1.43 ve geri esneme 0.084 mm iken T=0.8 mm sac kalınlığı için R/T oranı 5 olmakta ve geri esneme 2-3 kat artarak 0.195 mm'ye yükselmiştir.

Tablo 3. U, L ve Hood tipi profiller için R/T oranına bağlı geri esneme değerleri.

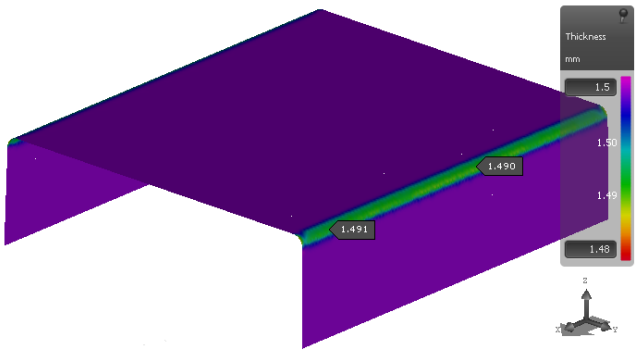
U Tipi Profil			L Tipi Profil			Hood Tipi Profil		
Büküm Radyüsü, R (mm)	R/T (sabit 1.2 mm sac kalınlığı için)	Geri Esneme Değeri	Büküm Radyüsü, R (mm)	R/T (sabit 1.2 mm sac kalınlığı için)	Geri Esneme Değeri	Büküm Radyüsü, R (mm)	R/T (sabit 1.8 mm sac kalınlığı için)	Geri Esneme Değeri
R=2	1.67	0.077	R=2	1.67	0.07	R=2	1.11	2.15
R=3	2.5	0.082	R=3	2.5	0.1	R=3	1.67	2.55
R=4	3.33	0.085	R=4	3.33	0.115	R=4	2.22	2.601
R=5	4.17	0.106	R=5	4.17	0.17	R=5	2.78	2.403
R=6	5	0.168	R=6	5	0.22	R=6	3.33	2.75
R=7	5.83	0.238	R=7	5.83	0.3	R=7	3.89	3.3
R=8	6.67	0.273	R=8	6.67	0.319	R=8	4.44	4.1
R=9	7.5	0.368	R=9	7.5	0.4	R=9	5	4.5
R=10	8.33	0.452	R=10	8.33	0.43	R=10	5.56	5.5
Sac Kalınlığı, T (mm)	R/T (sabit 8 mm büküm radyüsü için)	Geri Esneme Değeri	Sac Kalınlığı, T (mm)	R/T (sabit 4 mm büküm radyüsü için)	Geri Esneme Değeri	Sac Kalınlığı, T (mm)	R/T (sabit 6 mm büküm radyüsü için)	Geri Esneme Değeri
T=0.8	10	0.632	T=0.8	5	0.195	T=0.8	7.5	5.8
T=1.0	8	0.385	T=1.0	4	0.135	T=1.0	6	4.9
T=1.2	6.67	0.273	T=1.2	3.33	0.115	T=1.2	5	4.4
T=1.5	5.33	0.191	T=1.5	2.67	0.095	T=1.5	4	4
T=1.8	4.44	0.131	T=1.8	2.22	0.063	T=1.8	3.33	2.75
T=2.0	4	0.116	T=2.0	2	0.057	T=2.0	3	2.15
T=2.4	3.33	0.107	T=2.4	1.67	0.07	T=2.4	2.5	0.9
T=2.8	2.86	0.067	T=2.8	1.43	0.084			

Şekillendirme sonunda sac malzemenin istenilen formu koruyabilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı R/T oranı, sac malzemenin tüm kesitinde plastik deformasyon durumunun görülmesi için yeterince küçük olmalıdır. Bükme işlemi büyük çaplarda gerçekleştirildiğinde tarafsız düzlem merkezdedir. Ancak, küçük çapın etrafında yapılan bükme işleminde tarafsız eksen bası bölgesine doğru kayar. Merkez düzlem uzar ve bu durum sacın incelmesi olarak bilinir [25, 26]. Şekil 26'da U profil için T=1.5 mm sac kalınlığında farklı büküm radyüsleri için yapılan analizler sonucu sac malzemede meydana gelen incelme değerleri sunulmuştur.

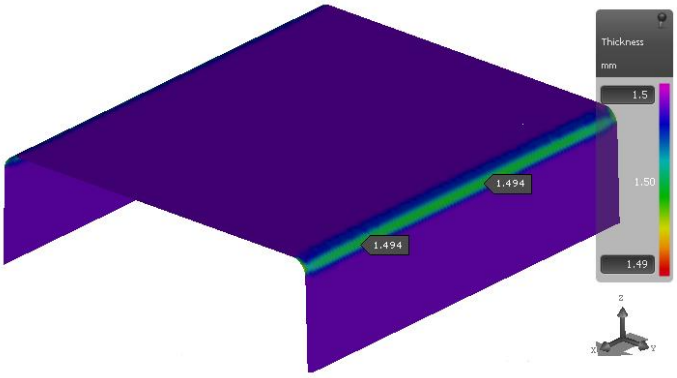
Şekil 26.a'da görülen R=2 mm büküm radyüsü için incelme değerleri diğer büküm radyüslerine göre daha fazladır. R=2 mm büküm radyüsünde 1.5 mm kalınlığındaki sac malzeme 1.45 mm kalınlığa düşmekte iken R=8 mm büküm radyüsünde ki incelme miktarı çok küçüktür. Bu sonuçtan küçük büküm radyüslerindeki incelmenin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



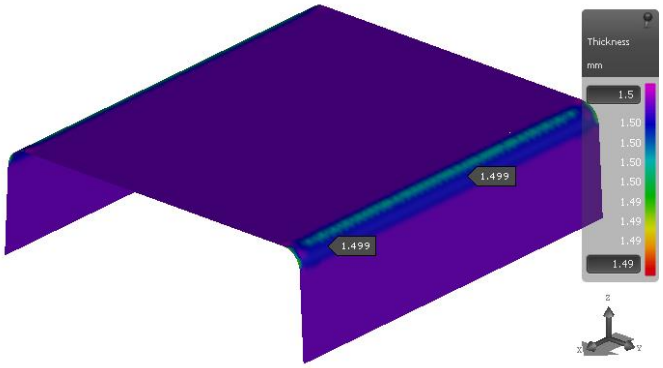
a) T=1.5 mm sac kalınlığı, R=2 mm büküm yarıçapı



b) T=1.5 mm sac kalınlığı, R=4 mm büküm yarıçapı



c) T=1.5 mm sac kalınlığı, R=6 mm büküm yarıçapı



d) T=1.5 mm sac kalınlığı, R=8 mm büküm yarıçapı

Şekil 26. U tipi profilde T=1.5 mm sac kalınlığı için farklı büküm radyüslerine göre incelme değerleri.

T=1.5 mm sac kalınlığında farklı büküm radyüsleri için yapılan FEA analizleri L ve Hood tipi profillerin bükümü için de gerçekleştirilmiştir. T=1.5 mm kalınlığındaki DP600 sac malzemenin L tipi profilde farklı büküm radyüslerinde bükülmesinde en fazla incelme R=2 mm büküm yarıçapında elde edilmiştir (T=1.448-1.454 mm'ye incelmiştir). Büküm yarıçapının artmasına bağlı olarak (R=8 mm) incelmenin azaldığı (T=1.491-1.494 mm'ye incelmiştir) da tespit edilmiştir. Hood tipi profilin analizlerinde de U ve L tipi profilde olduğu gibi küçük büküm radyüslerinde daha fazla incelmenin olduğu görülmüştür. R=2 mm büküm radyüsünde sac malzeme T=1.5 mm'den T=1.39 mm'ye incelirken R=8 mm de ise ancak T=1.42 mm kalınlığı kadar incelmiştir.

Üç profil tipi içinde büküm radyüslerinin (R) azalmasına bağlı olarak incelme miktarları artmıştır. İncelme miktarının bu şekilde değişmesinin temelindeki sebep aynı sac kalınlığındaki malzemenin küçük büküm radyüslerinde şekillendirme sonrası dış liflerindeki uzama miktarının daha fazla olmasıdır. Geri esneme değerlerinin büküm radyüslerine bağlı değişimi göz önüne alındığında incelme miktarıyla ilişkisi olduğu görülmektedir. İncelmenin fazla olduğu küçük büküm radyüslerinde geri esnemelerin az olduğu analizlerde tespit edilmiştir. Buradan incelmenin fazla olmasına neden olan sac malzemeye etkiyen yüksek çekme ve basma gerilmelerinin geri esneme miktarının da azalmasını sağladığı anlaşılmaktadır. Yani, büküm radyüslerinin küçük olması durumunda basma ve çekme gerilmeleri büyük, incelmeler fazla olacak ve yüksek gerilmelerin plastik deformasyonu arttırması sonucu geri esnemeler azalacaktır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç farklı büküm profiline sahip DP600 sac malzemenin şekillendirme sonrasında sac kalınlığına ve büküm radyüslerine bağlı olarak geri esneme değerleri sonlu elemanlar analizi (FEA) uygulanarak belirlenmiştir. Çalışmada farklı sac kalınlıkları (T=0.8-1.0-1.2-1.5-1.8-2.0-2.4 ve 2.8 mm) ve farklı büküm radyüsleri (R=23-4-5-6-7-8 ve 10 mm) için yapılan analiz sonucunda elde edilen geri esneme değerleri incelendiğinde;

1. Üç farklı tip parça profilinin şekillendirme sonrasında oluşan geri esneme değerleri büküm radyüslerinin arttırılmasıyla artmıştır.
2. Üç farklı tip parça profilinin şekillendirme sonrasında oluşan geri esneme değerleri sac kalınlığının artırılmasına bağlı olarak azalmıştır.
3. Analizlerde kullanılan tüm profil tipleri için şekillendirme sonrası arzu edilen optimum geri esneme değerleri, küçük büküm radyüsleri ve kalın sac malzemelerin seçilmesiyle sağlanmıştır.
4. Sac kalınlığı arttıkça büküm radyüslerinin geri esneme üzerindeki etkisi giderek azalmıştır.
5. Büküm radyüsü/sac kalınlığı (R/T) oranı arttıkça geri esneme miktarı artmaktadır.
6. DP600 gibi şekillendirme sonrasında büyük geri esnemelere sebep olan sac malzemeler için mümkün olduğunca tasarım aşamasındayken küçük büküm radyüslerinin kullanılmasıyla geri esnemeler azaltılacak ve böylece zamandan, işçilikten, enerjiden tasarruf edilmesi sağlanacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Wang, W., Wei, X., "The effect of martensite volüme and distribution on shear fracture propagation of 600-1000 Mpa dual phase sheet steels in the process of deep drawing", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.67, pp.100-107, 2013.

2. Ozturk, F., Toros, S., "Tensile and spring-back behavior of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures", Journal of Iron and Steel Research. International, Vol.16, No.6, pp.41-46, 2009.

3. Davies, R.G., "Influence of martensite composition and content on the properties of dual-phase steels", Metallurgical Transactions, Vol.18A, pp. 671-679, 1978.

4. Boldavin, H., Tekin, E.,"Çift Fazlı İçyapı Oluşturma İşleminin Yapı Çeliklerine Etkileri", 4. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitapçığı, s.249-262, 1991.

5. http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2008/dual_phase.jpg (Erişim Tarihi: 16.10.2015)

6. https://en.wikipedia.org/wiki/Spring_Back_Compensation (Erişim Tarihi: 16.10.2015)

7. http://image.thefabricator.com/a/die-basics-101-part-xv-springback.gif (Erişim Tarihi: 16.10.2015)

8. Souza, T., Rolfe, B.F., "Understanding robustness of springback in high strength steels", International Journal of Mechanical Sciences Vol.68, pp.236-245, 2013.

9. Sharad, G., Nandedkar, V.M., "Springback in Sheet Metal U Bending-Fea and Neural Network Approach", Procedia Materials Science, Vol.6, pp.835–839, 2014.

10. Tisza, M., Lukács, Z., "Springback analysis of high strength dual-phase steels", Procedia Engineering, Vol.81, pp. 975-980, 2014.

11. Bashah, N.A.K., Muhamad, N., Deros, B.M., Zakaria, A., Ashari, S., Mobin, A., Lazat, M.S.M.A., "Multi-regression modeling for springback effect on automotive body in white stamped parts", Materials and Design, Vol.46, pp.175-190, 2013.

12. Toros, S., Polat, A., Ozturk, F., "Formability and springback characterization of TRIP800 advanced high strength steel" Materials and Design, Vol.41, pp.298-305, 2012.

13. Schwarze, M., Vladimirov, I.N., Reese, S., "Sheet metal forming and springback simulation by means of a new reduced integration solid-shell finite element technology", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol.200, pp.454–476, 2011.

14. Aboozar Taherizadeh , Ghaei, A., Green, D.E., Altenhof, W.J., "Finite element simulation of springback for a channel draw process with drawbead using different hardening models", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.51, pp. 314-325, 2009.

15. Ghaei, A., "Numerical simulation of springback using an extended return mapping algorithm considering strain dependency of elastic modulus", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 65, pp.38-47, 2012.

16. Meinders, T., Burchitz, I.A., Bonte, M.H.A., Lingbeek, R.A., "Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimization", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, pp.499-514, 2008.

17. Li, H., Sun, G., Li, G., Gong, Z., Liu, D., Li, Q., "On twist springback in advanced high-strength steels", Materials and Design, Vol.32, pp.3272-3279, 2011.

18. Govik, A., Rentmeester, R., Nilsson, L., "A study of the unloading behaviour of dual phase steel", Materials Science and Engineering A, Vol.602, pp.119-126, 2014.

19. Thipprakmas, S., Phanitwong, W., "Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique", Materials and Design, Vol.32, pp.4430-4436, 2011.

20. Erdemir Malzeme Kataloğu, https://www.erdemironline.com/Extranet/static/tr/static/EXUrunKatalogu.jsp (Erişim Tarihi: 16.10.2015)

21. Autoform Malzeme Kataloğu, 2015.

22. http://www.makeskalip.com/wp-content/uploads/2011/01/bukmepic5.jpg (Erişim Tarihi: 20.10.2015)

23. Mkaddem, A., Saidane, D., "Experimental approach and RSM procedure on the examination of springback in wiping-die bending processes", Journal of Materials Processing Technology, Vol.189, pp.325-333, 2007.

24. Carden, W. D., Geng, L. M., Matlock, D. K., Wagoner, R. H., "Measurement of springback", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.44, pp.79-101, 2002.

25. Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J., Mechanics of Sheet Metal Forming, Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 1998.

26. Schey, J. A., Introduction to Manufacturing Processes, *McGraw-Hill Co.*, Boston, USA, 2000.