



Plastisite Modellerinde Pekleşme Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi İle Tespiti

Emre ESENER*

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik
emre.esener@bilecik.edu.tr ORCID: 0000-0001-5854-4834, Tel: (228) 212 12 48

Geliş: 07.11.2018, Revizyon: 10.12.2018, Kabul Tarihi: 11.01.2019

Öz

Malzemelerin deformasyonu sırasında akma davranışının gelişim göstermesi pekleşme davranışı olarak adlandırılır. Malzemelerin plastik davranışını temsil eden plastisite modelleri sonlu elemanlar analizlerine malzeme modelleri olarak entegre edilmişlerdir. Her malzeme modeli kendi bünyesinde farklı kabuller barındırır. Pekleşme açısından plastisite modelleri değerlendirildiğinde temelde izotropik pekleşme ve kinematik pekleşme kabullerini yapan iki temel grup ortaya çıkmaktadır.

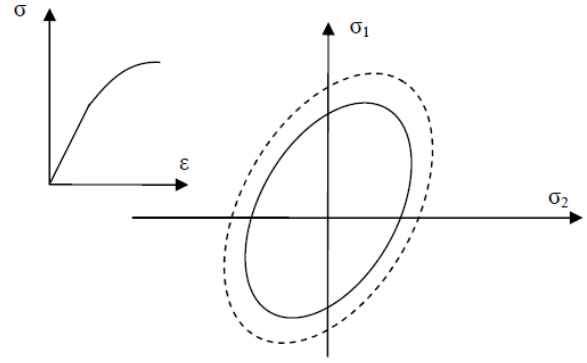
Bu çalışmada sac metal şekillendirme işlemlerinden bir panel çekme prosesi temel alınarak plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizleri ile değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 4 farklı malzeme, izotropik ve kinematik pekleşme kabullerine sahip farklı plastisite modelleri ile modellenmiş ve pekleşme etkisinin gerilme, plastik gerinim ve şekillendirilebilirlik üzerine etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sac metal şekillendirme; Pekleşme; Sonlu elemanlar analizi; Plastisite Modelleme.

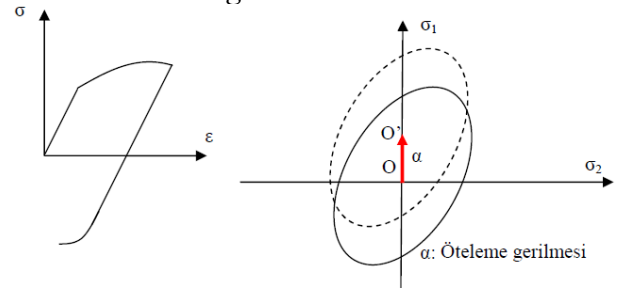
* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Plastik şekil verme yöntemleri üretim prosesleri açısından oldukça önemli bir yerde konumlanmaktadır. Yüksek toleranslarda ürün geometrisinin yakalanması, karmaşık geometri formuların elde edilebilmesi ve seri üretime yatkınlıkları en büyük avantajları arasında yer almaktadır. Plastik şekil verme kavramı, ürün geometrisinin elde edilebilmesi adına başlangıç malzeme formunun kalıcı olarak deforme edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Çapan, 2010). Metalik malzemeler ilk olarak elastik, akma gerilmesi sınırının aşılması sonrasında ise plastik deformasyona uğrarlar. Plastik deformasyon sonrasında dislokasyon yığılmalarından dolayı malzeme direnci artmakta ve şekil değişimi için daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum pekleşme olarak tanımlanmaktadır. Pekleşme davranışı iki boyutlu gerilme uzayında akma yüzeyleri ile temsil edilmektedir. Akma yüzeyleri kapalı, düzgün ve konveks olmalıdır. Akma yüzeylerinde, yüzey içerisindeki noktalar elastik deformasyonla ilgilidir. Akma yüzeyinin üzerindeki noktalar plastik durumla ilgili olup yüzeyin dışındaki noktalar ise fiziksel olarak bir anlam taşımazlar. Pekleşme davranışı başlangıç akma gerilmesinin deformasyon sırasındaki gelişimini gösterdiğinden akma yüzeyleri, pekleşme davranışı ile birlikte değişim sergilerler. Sergiledikleri bu değişim pekleşmenin tipini göstermektedir. Eğer akma yüzeyi deformasyon sırasında orantısız olarak genişliorsa buna izotropik pekleşme, boyutsal olarak değişmeyip gerilme uzayında konum değiştiriyorsa bu duruma kinematik pekleşme adı verilir. Kinematik pekleşmede konum değişimi öteleme gerilmesi adı verilen bir parametre ile tanımlanır. Akma yüzeylerinin izotropik ve kinematik pekleşme durumları sırası ile Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İzotropik pekleşme davranışının şematik gösterimi



Şekil 2. Kinematik pekleşme davranışının şematik gösterimi

İzotropik pekleşmede akma davranışı çekme ve basma durumlarında aynıdır. Bu yaklaşım bazı malzemeler için doğru olmakla birlikte, genel malzeme davranışını tanımlamak adına yeterli bulunmamaktadır (Xie vd., 2018; Hakansson vd., 2005; Coombs ve Motlagh, 2017). Bu kapsamda akma yüzeyinin boyut değiştirmedeği, yalnızca yer değiştirdiği kinematik pekleşme kavramı kullanılmaktadır. Kinematik pekleşme, çekme-basma yüklemeleri sonucunda malzeme davranışını tanımlayabilmektedir. Kinematik pekleşme davranışının bu özelliği orantısız olmayan yüklem sırasında mekanik özellikleri etkileyen parametrelerden birisi olan Bauschinger etkisini dikkate alabilmesini sağlamaktadır. Bu durum genellikle gerinim yönünün değişmesi sonucu malzemenin akma gerilmesinde meydana gelen düşüşle ilgilidir (Paul vd., 2016).

Plastisite Modelleme

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak analitik çözümler kendisini hızlı bir şekilde sayısal çözümlere bırakmıştır. Mühendislik alanında sonlu elemanlar

analizlerinin kullanımı özellikle endüstriyel açıdan büyük atılımlar sağlamıştır. Deneyanılma yöntemleri ve büyük kabuller barındıran analitik ifadeler yerine artık hassas çözümler elde edilebilen ve üretimde zaman ve maliyet kazancı sağlayan sonlu elemanlar analizleri kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizleri, temel prensipte, karmaşık bir yapının basit sonlu elemanlara ayrılması sonrasında belirli sınır şartları ve dış yükler altında malzeme davranışının tahmin edilmesini içeren bir sayısal yöntemdir. Sonlu elemanlar analizlerinde en önemli husus tahmin hassasiyetidir. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli bir çok hesap parametresi barındırmakta ve bu parametreler çözüm hassasiyetine doğrudan etki etmektedir (Ahmed, 2016). Malzemelerin yük altındaki plastik davranışını tanımlayan plastisite modelleri ise sonlu elemanlar tahmin hassasiyetinde en önemli rolü oynayan parametre olarak öne çıkmaktadır (Hou vd., 2017). Şekil verme yöntemlerinde malzemede meydana gelen plastik deformasyonların modellenebilmesi için malzemenin elastik ve plastik davranışlarını tanımlayan modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu modeller sonlu elemanlar yöntemi terminolojisinde malzeme modelleri olarak adlandırılmaktadır. Doğru malzeme modelinin tespiti mühendislik açısından oldukça kritiktir. Bu kapsamda, malzeme modelleri için gerekli malzeme parametrelerinin de hassas bir biçimde belirlenmesi aynı şekilde önem arz etmektedir.

Plastik malzeme davranışı, elastik malzeme davranışından daha karmaşık bir kavramdır. Elastik malzeme davranışında, Hooke kanunu vasıtası ile gerilme ve gerinim değerleri arasında doğrudan lineer bir ilişki kurulabilmektedir. Plastik malzeme davranışında, plastik gerinimler yalnızca gerilme parametreleri ile tanımlanamazlar çünkü plastik gerinimler malzemenin tüm yükleme geçmişine ve gerilme durumuna nasıl ulaşıldığına bağlıdır (Dieter, 1961). Bir malzemenin genel gerilme durumu altında plastik davranışının modellenebilmesi için bir akma kriterine, bir akma kuralına ve bir pekleşme kuralına ihtiyaç vardır. Bu

parametrelerden akma kriterleri, akmanın olduğu andaki gerilme bileşenleri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Akma kuralı ise gerilme ve gerinim oranı bileşenleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Son olarak şekil değişimi süresince başlangıç akma gerilmesi pekleşme kuralları vasıtası ile tanımlanmaktadır. Bu parametrelerden pekleşme kuralları, pekleşme davranışının plastisite modeline çeşitli kabullere göre entegre edilme durumları çerçevesinde farklılık göstermektedir. Kimi plastisite modelleri izotropik pekleşme kabulü, kimisi ise kinematik pekleşme kabulü yapmakla birlikte günümüzde her iki durumu modelleyebilen birleşik pekleşme durumu kabulü yapan plastisite modelleri de geliştirilmiştir (Qin vd., 2018). En eski akma kriteri Tresca tarafından sunulmuş olup (Tresca, 1864) ardından von Mises kriterinin geliştirilmesi ile (Mises, 1913) plastisite modelleme bir ivme kazanmış ve günümüzde kullanılan çoğu malzeme modeli von Mises kriterinin geliştirilmesi sonucunda elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada izotropik ve kinematik pekleşme kabulleri yapan plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, farklı pekleşme kabulleri yapan plastisite modelleri kullanılarak sac metal şekillendirme prosesi üzerinden pekleşmenin şekillendirilebilirliğe etkileri irdelenmiştir.

Uygulama Çalışması

Çalışmada pekleşme etkisinin tespiti için plastik şekil verme yöntemlerinden sac metal şekillendirme prosesi tercih edilmiştir. Sac metal şekillendirme yöntemleri başta otomotiv ve havacılık sektörleri olmak üzere çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu geniş kullanım alanının en önemli nedenleri sac metallerin mukavemet/ağırlık oranlarının oldukça iyi olması ve yüksek doğrulukta şekil alabilirliğe sahip olmalarıdır. Aynı zamanda proseste bir çok karmaşık aşamanın bulunması sonlu elemanlar analizlerinin değerlendirilmesi ve özellikle de plastisite modellerinin

anlaşılabilirliği açısından avantaj sağlamaktadır (Ingarao vd., 2009; Ozsoy vd., 2014).

Malzeme ve Yöntem

Çalışma kapsamında pekleşme etkisinin malzemeye bağlı olarak nasıl değiştiğinin tespit edilmesi de amaçlanmıştır. Bu nedenle alüminyum alaşımlarından 6022, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik (HSLA), alüminyumla deokside edilen derin çekme kalite çeliği (AKDQ) ve yeni nesil yüksek mukavemetli çeliklerden çift fazlı DP600 çeliği olmak üzere 4 farklı malzeme kullanılmıştır. Malzemelerin plastik davranışını modellemek amacı ile izotropik pekleşme kabulü yapan Hill-48 plastisite modeli (Hill, 1948) ve kinematik pekleşme kabulü yapan Yoshida-Uemori plastisite modelleri (Yoshida ve Uemori, 2008) kullanılmıştır. Bu iki modelin tercih nedeni kendi kabulleri çerçevesinde gerek hız, gerekse de hassasiyet anlamında kendini ispatlamış modeller olmalarıdır (Awais vd., 2017; Boutenel vd., 2018).

R.Hill, 1948 yılında von Mises kriterini genelleştirerek izotropik pekleşme temelinde bir anizotropik akma kriteri geliştirmiştir. Malzemenin üç ortogonal simetri düzleminde anizotropiye sahip olması gerekmektedir. Kriter ikinci dereceden bir fonksiyon olarak Denklem (1)'deki şekilde yazılabilmektedir.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

Burada f, akma fonksiyonu, F, G, H, L, M, N malzemenin anizotropi parametreleri ve x, y, z asal anizotropik eksenlerdir. Sac metal şekillendirme gibi düzlem gerilme durumları için ise Hill-48 akma kriteri Denklem (2)'deki formu alır.

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2)$$

Sac metal şekillendirme yöntemlerinde, anizotropi parametreleri r_0 , r_{45} , r_{90} ve asal anizotropik yönlerdeki akma gerilmeleri $X=\sigma_0$, $Y=\sigma_{90}$ olarak isimlendirilir. Anizotropi parametreleri ve F, G, H katsayıları arasındaki

ilişki Denklem (3)'te olduğu gibi gösterilebilmektedir.

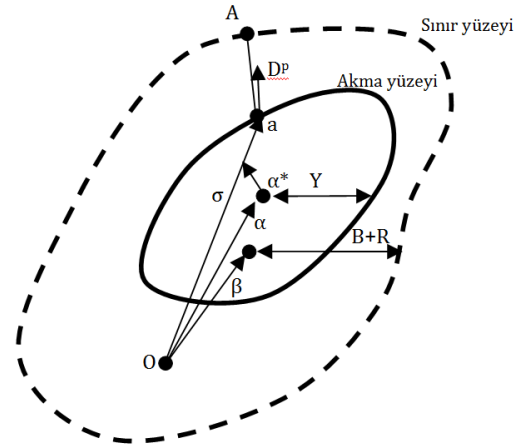
$$r_0 = \frac{H}{G}, \quad r_{90} = \frac{H}{F}, \quad \sigma_{45} = \frac{H}{F+G} - \frac{1}{2} \quad (3)$$

Son olarak akma gerilmeleri ve anizotropi parametreleri arasındaki ilişki Denklem (4)'te gösterilmiştir.

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} = \sqrt{\frac{r_0(1+r_0)}{r_{90}(1+r_0)}} \quad (4)$$

Hill-48 plastisite modeli problemin durumuna göre en genel durumdan özel durumlara indirgenebilmekte olup, temelde bir elips ailesini temsil etmektedir.

Kinematik pekleşme kabulü yapan Yoshida-Uemori plastisite modeli, Chaboche plastisite modelinin (Lemaitre ve Chaboche, 1990) daha hassas tahminler yapabilmesi adına geliştirilmiş halidir. Bu teori, pekleşme kuralını tanımlayan iki yüzeye ihtiyaç duyar. Bunlar; akma yüzeyi ve sınır yüzeyidir. Şekillendirme prosesinde, akma yüzeyi boyut olarak değişmez fakat deformasyonla akma yüzeyinin merkez noktası hareket eder, sınır yüzeyi ise hem şekil olarak hem de konum olarak değişir. Bu iki yüzeyli modelin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Yoshida-Uemori modelinde akma yüzeylerinin şematik gösterimi (Ls-Dyna Theoretical Manual, 1998)

Burada, “O” akma yüzeyinin merkez noktasıdır, α^* , akma yüzeyinin mevcut durumdaki merkezidir ve α ise sınır yüzeyin merkezidir. β , iki yüzeyin merkez noktaları arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Y, akma yüzeyinin boyutudur

ve deformasyon süresince değişmemektedir. $B+R$, sınır yüzeyinin boyutunu temsil etmektedir, R izotropik pekleşme ile ilişkilidir. Bu durum Denklem (5)'te modellenmiştir.

$$\alpha_* = \alpha - \beta$$

$$\alpha_* = c \left[\frac{a}{Y} (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{a}{\alpha_*}} \alpha_* \right] \varepsilon^p \quad (5)$$

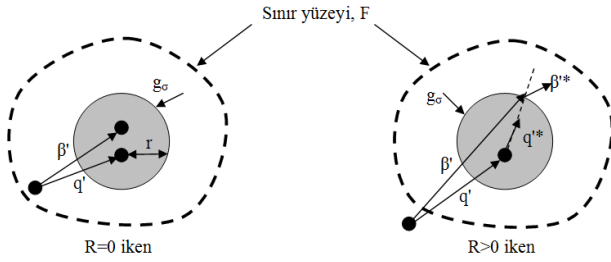
$$a = B + R - Y$$

Sınır yüzeyinin boyut ve konum değişimi ise Denklem (6)'daki şekilde tanımlanır. Bu durumun şematik gösterimi ise Şekil 4'te verilmiştir.

$$\dot{R} = k(R_{sat} - R)\dot{\varepsilon}^p$$

$$\dot{\beta}' = k \left(\frac{2}{3} bD - \beta' \dot{\varepsilon}^p \right) \quad (6)$$

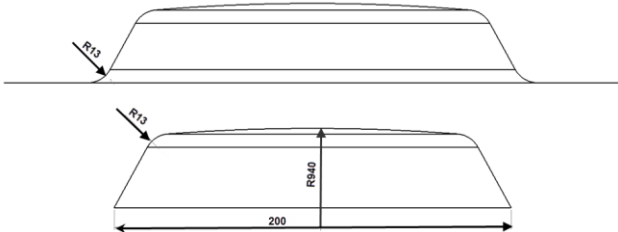
$$\sigma_{sınır} = B + R + \beta$$



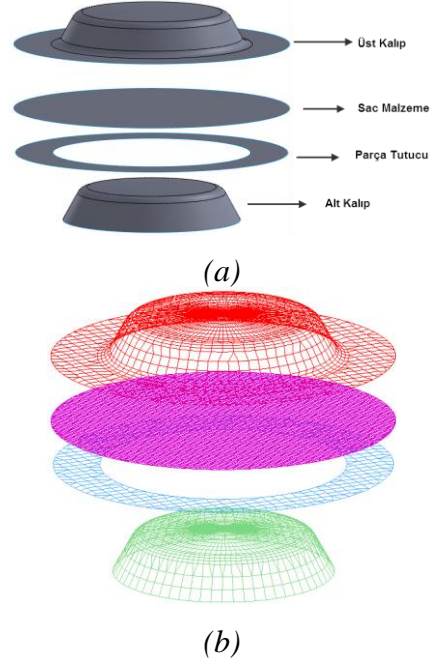
Şekil 4. Sınır yüzeyi (Ls-Dyna Theoretical Manual, 1998)

Sonlu Elemanlar Analizleri

Çalışma kapsamında yukarıda anlatılan plastisite modelleri sac metal şekillendirme yöntemlerinden bir panel çekme prosesi üzerinden incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak kalıp takım yüzeyleri modellenmiş ve sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Panel çekme prosesine ait kalıp geometrisi Şekil 5'te sonlu elemanlar modeli ise Şekil 6'da verilmiştir.

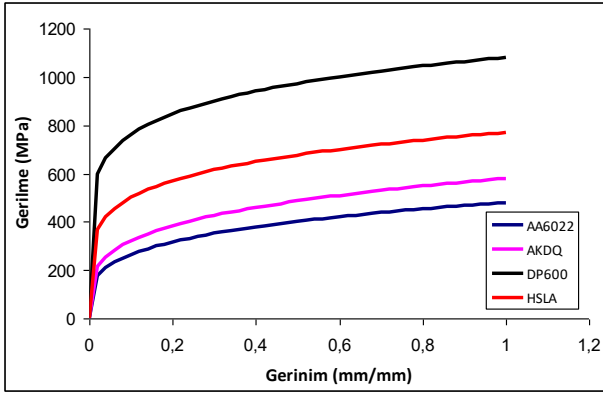


Şekil 5. Panel çekme prosesi kalıp geometrisi



Şekil 6. Panel çekme prosesi (a) kalıp takım yüzeyleri (b) sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar analizleri Ls-Dyna sonlu elemanlar paket programı kullanılarak adımli çözüm metodu ile gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman olarak düzlem gerilme kabuk eleman formülasyonu kullanılmış ve üst kalıp elemanında 2054 adet, alt kalıp elemanında 1388 adet, parça tutucuda 408 adet ve sacda 8581 adet olmak üzere toplam modelde 12431 adet eleman oluşturulmuştur. Kullanılan her malzeme için $\varepsilon=1$ değerine kadar analitik olarak elde edilen gerilme-gerinim eğrileri Şekil 7'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Malzemelerin plastisite modellerinde kullanılan mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiş olup Tablo 2'de ise sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan hesaplama ve proses parametreleri verilmiştir. Tüm malzemeler için proses ve hesaplama parametreleri sonlu elemanlar modellerinde aynı olup yalnızca plastisite modelleri değişken olarak kullanılmış böylelikle pekleşme etkisinin tespiti amaçlanmıştır. Belirtilen koşullar altında her malzeme için Hill-48 ve Yoshida-Uemori plastisite modelleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelere ait analitik çekme eğrilerinin karşılaştırılması

Tablo 1. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin plastisite parametreleri (Ghaei, 2010)

MALZEME	AA6022	AKDQ	DP600	HSLA
HILL-48 PLASTİSİTE MODEL PARAMETRELERİ				
AKMA GERİLMESİ (MPa)	135	158	420	394
ELASTİSİTE MODÜLÜ (GPa)	70	206	206	206
MUKAVEMET KATSAYISI (MPa)	479,9	579,9	1080,7	770
PEKLEŞME ÜSTELİ	0,258	0,256	0,152	0,187
HADDE YÖNÜNDE ANİZOTROPİ	1,029	1,546	0,821	0,581
HADDE YÖNÜNE 45°'DE ANİZOTROPİ	0,532	1,508	0,915	1,166
HADDE YÖNÜNE DİK ANİZOTROPİ	0,728	1,942	0,905	1,013
YOSHIDA-UEMORI PLASTİSİTE MODEL PARAMETRELERİ				
B (MPa)	150	190	555	400
C	700	300	200	200
R _{SAT} (MPa)	130	240	190	195
K	13	8,5	12	8
B (MPa)	40	10	110	30
H	0,01	0,7	0,9	0,8

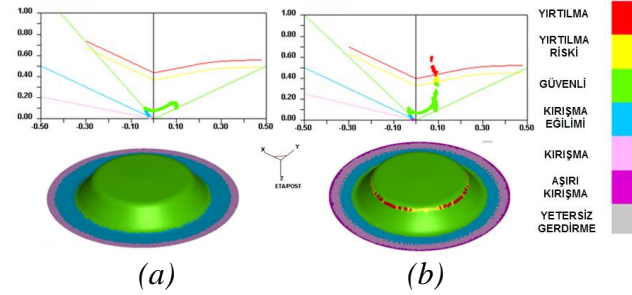
Tablo 2. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan parametreler

Üst kalıp hızı	2000 mm/s
Sürtünme katsayısı	0.125
Parça tutucu kuvvet	622 kN
Çekme derinliği	40 mm
Malzeme kalınlığı	1,5 mm
İntegrasyon nokta sayısı	7
Eleman formülasyonu	Tam integrasyon
Eleman tipi	Kabuk eleman

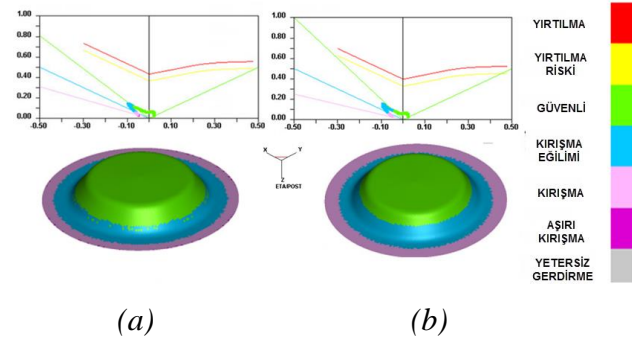
Sonuçlar ve Değerlendirme

Simülasyonların gerçekleştirilmesinin ardından sonlu elemanlar analizi sonuçları plastisite modelleri açısından değerlendirilmiştir. Panel çekme işlemi sonrasında ilk olarak malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla malzemelere ait şekillendirme sınır diyagramları (ŞSD) elde edilmiştir. Malzemelere ŞSD'ler Şekil 8-11'de verilmiştir. ŞSD'ler incelendiğinde çelik malzemeler açısından şekillendirilebilirlik tahminlerinin pekleşme kuralları açısından farklılık arz eden her iki plastisite modeli ile de

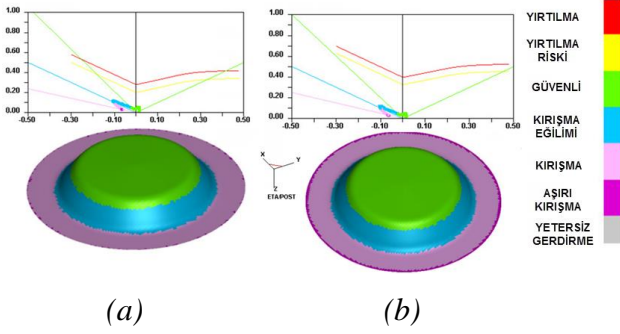
yırtılma, kırışma ve gerdirme açısından yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Her iki model de çelik malzemeler açısından güvenli bir şekillendirme ve benzer gerinim değerlerini göstermektedir. Fakat alüminyum alaşımı açısından bakıldığında Hill-48 modeli güvenli bir şekillendirme tahmini gerçekleştirirken Yoshida-Uemori modeli alüminyum için bir yırtılma öngörmektedir. Alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik özellikleri çelik malzemelere göre kafes yapıları gereği daha iyi olması ve alüminyum malzemenin 1,5 mm kalınlığı ile çelik malzemelere göre daha kalın olması göz önüne alındığında Hill-48 modelinin yırtılma tahmininin daha doğru olduğu görülmektedir. Bu kalınlık seviyesindeki alüminyum malzemeler için bu gerinim seviyelerinde bir yırtılma beklenilmemektedir.



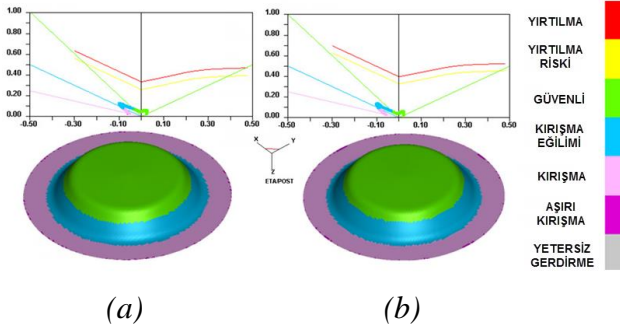
Şekil 8. 6022 alüminyum alaşımına ait şekillendirme sınır diyagramı (a) Hill-48 plastisite modeli ile (b) Yoshida-Uemori plastisite modeli ile



Şekil 9. AKDQ çeliğine ait şekillendirme sınır diyagramı (a) Hill-48 plastisite modeli ile (b) Yoshida-Uemori plastisite modeli ile

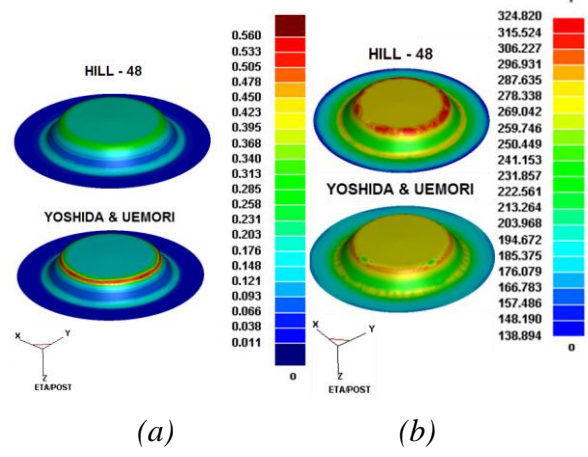


Şekil 10. DP600 çeliğine ait şekillendirme sınır diyagramı (a) Hill-48 plastisite modeli ile (b) Yoshida-Uemori plastisite modeli ile

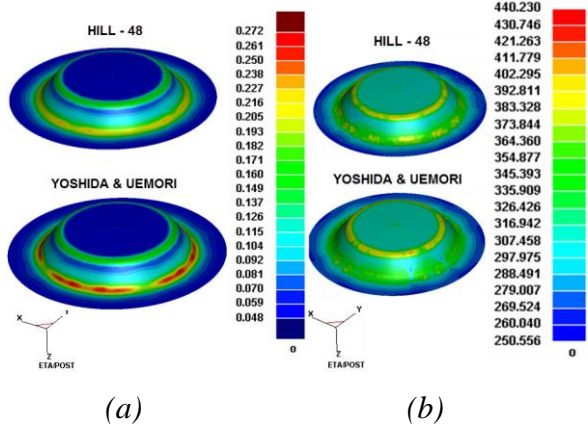


Şekil 11. HSLA çeliğine ait şekillendirme sınır diyagramı (a) Hill-48 plastisite modeli ile (b) Yoshida-Uemori plastisite modeli ile

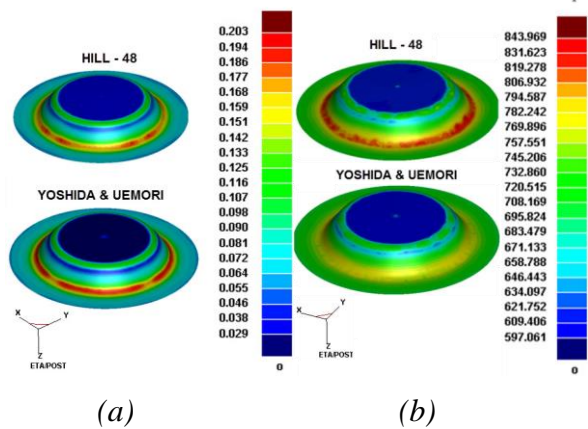
Bir sonraki değerlendirme malzemelerin plastik gerinim ve efektif gerilme değerleri üzerinden yapılmıştır. Malzemelere ait plastik gerinim ve efektif gerilme dağılımları Şekil 12-15'te verilmiştir. Tüm modeller incelendiğinde alüminyum alaşımı dışında çelik malzemelerin tamamında efektif gerilme değerlerine bakıldığında her iki plastisite modeli tahminlerinin benzer seviyede olduğu görülmektedir. Bu durumu desteklemek adına gerinim değerlerine bakıldığında her iki plastisite modelinin gerinim değerlerinde de birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu iki durum da birbirini desteklemektedir, gerinim değerlerindeki yakınlık efektif gerilme değerlerine de yansımıştır. Alüminyum alaşımı açısından modeller arasındaki farklılık kinematik pekleşme modelinin bir yırtılma öngörmesi sonucu plastik gerinim değerlerinin kinematik pekleşme modelinde daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



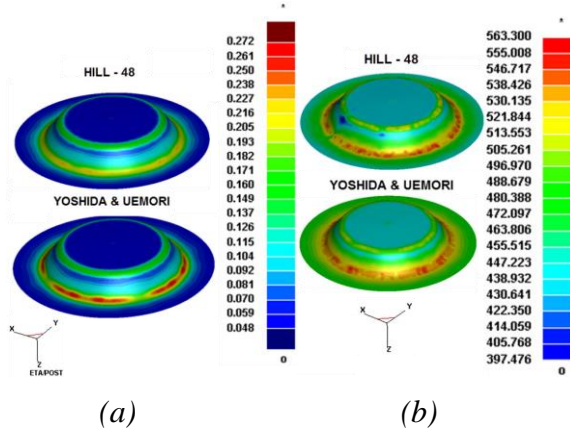
Şekil 12. 6022 alüminyum alaşımına ait (a) plastik gerinim (b) maksimum von-Mises efektif gerilme dağılımları



Şekil 13. AKDQ çeliğine ait (a) plastik gerinim (b) maksimum von-Mises efektif gerilme dağılımları

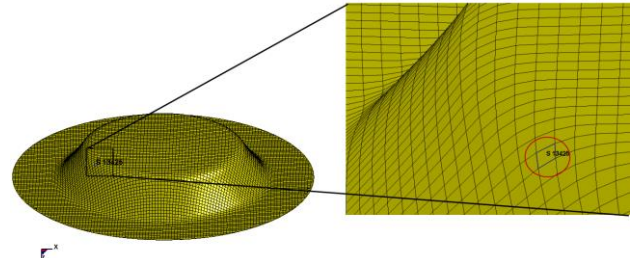


Şekil 14. DP600 çeliğine ait (a) plastik gerinim (b) maksimum von-Mises efektif gerilme dağılımları

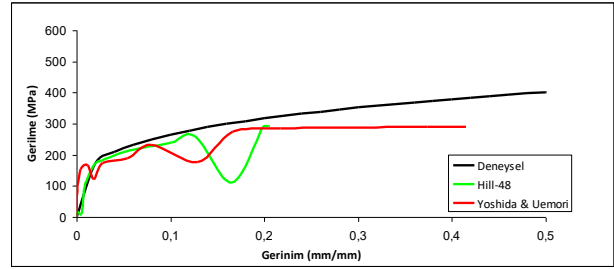


Şekil 15. HSLA çeliğine ait (a) plastik gerinim (b) maksimum von-Mises efektif gerilme dağılımları

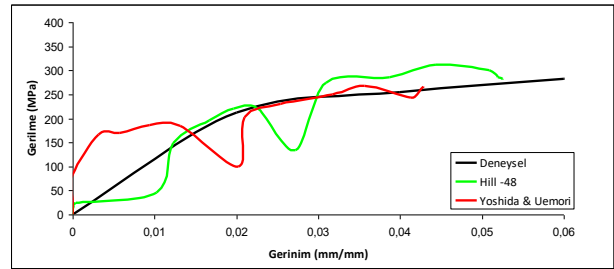
Her iki modelin de performansını karşılaştırma amacıyla her simülasyon için omuz bölgesinden aynı eleman seçilerek elemana ait gerilme-gerinim eğrisi oluşturulmuş ve bu eğri malzemeye ait deneysel çekme eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Seçilen elemana ait görsel Şekil 16'da verilmiştir. Karşılaştırma sonuçları ise Şekil 17-20'de görülmektedir. Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde AA6022 malzemesi için her iki plastisite modelinin de benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Fakat Yoshida&Uemori plastisite modelinin daha fazla plastik deformasyon öngörmesinden dolayı elemana ait gerilme-gerinim eğrisi de daha fazla deformasyon öngörmektedir. Çelik malzemeler için ise sonuçlar incelendiğinde Hill-48 modelinin gerilme-gerinim eğrisini daha başarılı bir şekilde öngörebildiği tespit edilmiştir. İzotropik pekleşme davranışı şekillendirilebilirlik açısından kinematik pekleşme modeline göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Sac metal şekillendirme proseslerinde şekil bozukluğu tahmini gibi kapalı adımlı iteratif çözüm gerektiren problemlerde ise Bauschinger etkisini de dikkate alabilen kinematik pekleşme modellerinin daha başarılı tahminler yaptığı bilinmektedir (Peng vd., 2013; Chongthairungruang vd., 2013). Sonuç olarak özellikle çelik malzemeler için şekillendirilebilirlik simülasyonlarında Hill-48 plastisite modelinin başarılı olduğu tespit edilmiştir.



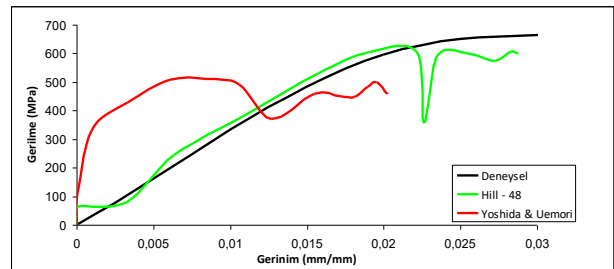
Şekil 16. Gerilme-gerinim sonuçlarının elde edildiği omuz bölgesinden seçilen eleman



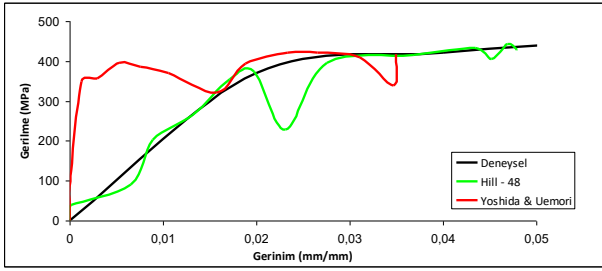
Şekil 17. Alüminyum 6022 alaşımı için omuz bölgesindeki elemana ait gerilme-gerinim eğrisinin deneysel eğri ile karşılaştırılması



Şekil 18. AKDQ çeliği için omuz bölgesindeki elemana ait gerilme-gerinim eğrisinin deneysel eğri ile karşılaştırılması

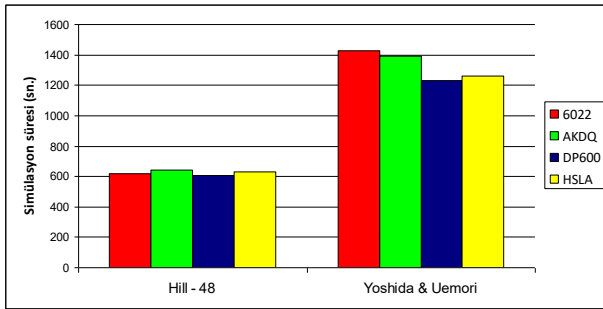


Şekil 19. DP600 çeliği için omuz bölgesindeki elemana ait gerilme-gerinim eğrisinin deneysel eğri ile karşılaştırılması



Şekil 20. HSLA çeliği için omuz bölgesindeki elemana ait gerilme-gerinim eğrisinin deneysel eğri ile karşılaştırılması

Genel bir doğrulama yapılması adına parçada en fazla deformasyona uğrayan omuz bölgesinden seçilen bir sonlu elemana ait gerilme-gerinim değerleri malzemelere ait çekme eğrileri ile karşılaştırıldığında çelik malzemeler için Hill - 48 modelinin daha doğru sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur. Bu durumların dışında özellikle endüstriyel açıdan oldukça önemli olan simülasyon süreleri de dikkate alınarak bir karşılaştırma yapılmıştır. Simülasyonlar Intel(R) Core(TM) i5 - 4310U 2.00 Ghz hızında işlemcili ve 8 GB ram'e sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiş olup, simülasyon sürelerine ait karşılaştırma sonucu Şekil 21'de verilmiştir. Görüldüğü üzere Hill -48 modeli simülasyon süresi açısından da üstünlüğe sahiptir.



Şekil 21. Her iki plastisite modeli için simülasyon sürelerinin karşılaştırılması

Kaynaklar

- Ahmed, M., (2016). Adaptive finite element simulation of sheet forming process parameters. Journal of King Saud University-Engineering Sciences.
- Awais, M., Sorvari, J., Tanninen, P., & Leppänen, T., (2017). Finite element analysis of the press

- forming process. International Journal of Mechanical Sciences, 131, 767-775.
- Boutenel, F., Delhomme, M., Velay, V., & omain Boman, R., (2018). Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes. Comptes Rendus Mécanique, In press.
- Chongthairungruang, B., Uthaisangsuk, V., Suranuntchai, S., Jirathearanat, S., (2013). Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels, Materials and Design, 50:253-266.
- Coombs, W. M., & Motlagh, Y. G., (2017). NURBS plasticity: Yield surface evolution and implicit stress integration for isotropic hardening. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 324, 204-220.
- Çapan, L., (2010), Metallere Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitapevi, 5. Baskı, İstanbul.
- Dieter, G. E., (1961). Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company.
- Ghaei A., (2010). Modeling Springback in Stamped Automotive Structures, Electronic Theses and Dissertations, Doktora Tezi, Mechanical, Automotive & Materials Engineering, The University of Windsor.
- Hakansson, P., Wallin, M., & Ristinmaa, M., (2005). Comparison of isotropic hardening and kinematic hardening in thermoplasticity. International Journal of Plasticity, 21(7), 1435-1460.
- Hill, R., (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc. London, pp.281-297.
- Hou, Y., Min, J., Lin, J., Liu, Z., Carsley, J. E., & Stoughton, T. B., (2017). Springback prediction of sheet metals using improved material models. Procedia Engineering, 207, 173-178.
- Ingarao, G., Di Lorenzo, R., & Micari, F., (2009). Analysis of stamping performances of dual phase steels: a multi-objective approach to reduce springback and thinning failure. Materials & Design, 30(10), 4421-4433.
- Lemaitre, J., Chaboche, JL., (1990). Mechanics of solid materials, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ls-Dyna Theoretical Manual, (1998). Livermore Software Technology Corporation.
- Mises, R., (1913). Mechanics of solids in plastic state (Almanca), Göttinger Nachrichten Math. Phys. Klasse, p.582.
- Ozsoy, M., Esener, E., Ercan, S., & Firat, M., (2014). Springback predictions of a dual-phase steel considering elasticity evolution in stamping process. Arabian Journal for Science and Engineering, 39(4), 3199-3207.

- Paul, J. D., Hoppe, R., & Appel, F., (2016). On the Bauschinger effect in TiAl alloys. *Acta Materialia*, 104, 101-108.
- Peng, X., Shi, S., Hu, K., (2013). Comparison of material models for springback prediction in an automotive panel using finite element method, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(10):2290-2296.
- Qin, J., Holmedal, B., & Hopperstad, O. S., (2018). A combined isotropic, kinematic and distortional hardening model for aluminum and steels under complex strain-path changes. *International Journal of Plasticity*, 101, 156-169.
- Tresca, H., (1864). On the yield of solids at high pressures (Fransızca), *Comptes Rendus Academie des Sciences, Paris* 59, pp.754.
- Xie, Q., Van Bael, A., An, Y. G., Lian, J., & Sidor, J. J., (2018). Effects of the isotropic and anisotropic hardening within each grain on the evolution of the flow stress, the r-value and the deformation texture of tensile tests for AA6016 sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 721, 154-164.
- Yoshida, F., Uemori, (2002). T., A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation, *Int. J. Plasticity*, 18:661-689.

Determining Hardening Effect In Plasticity Models Using Finite Element Analysis

Extended abstract

Sheet metal parts are getting more widespread instead of casting, machining and forging parts due to its functionality, simplicity and easily controllable production parameters. New fuel economy and emission regulations create its own dynamism in sheet metals used in automotive industry. The first-generation high-strength steels like DP, TRIP, CP, Manganese-Boron are therefore produced with a lower cross-sectional area for higher strength and still used in the automotive industry. In this area, researches are ongoing and new generation steels are developing with higher strength but less uniform elongation. Formability of sheet metals has a critical precaution at the design stage of processes. For this reason determining the plastic behavior of materials is a critical step especially in numerical analyses, and hardening of the material must be described in plasticity models.

Hardening can be described as the improvement of materials' flow behavior. Plasticity models, which represents plastic behavior of materials, are integrated as "material models" into finite element analysis. Each material model have different assumptions. Plasticity models can be grouped as isotropic and kinematic hardening models with the perspective of material hardening.

In this study, hardening effects in plasticity models were investigated by sheet metal panel forming process using finite element analysis. For this purpose, 4 different materials were modeled using different plasticity models, and hardening effects were investigated by means of stress, plastic strain, and formability.

For this purpose, aluminum alloy 6022, high strength low alloy steel (HSLA), aluminum killed drawing quality steel (AKDQ), and dual phase DP600 steel were used in studies. Hill-48 isotropic hardening model, and Yoshida-Uemori kinematic hardening plasticity models were used to determine plastic behavior of the materials.

These models were applied on a panel sheet metal forming process. For this pupose, die tools were designed and finite element model is generated.

Results were investigated by means of plasticity modelling. Firstly, formability of the materials were compared. For this purpose, formability limit diagrams were used in comparisons. As a result, it is seen that the formability predictions were similar by the perspective of plasticity models. Than, comparison of efective plastic strain, and efective stress values were applied. It is seen that results were similar by means of prediction accuracy except aluminum alloy. This difference occurs from hardening effect.

As a general result, it is seen that finite element analyses prediction of different hardening models were similar except aluminum alloy. A validation of the models were obtained by a finite element from the shoulder of the part. The stress-strain results of the element was compared with the experimental stress-strain curves of the materials. It is seen that the Hill-48 plasticity model made the most accurate prediction for all materials.

Keywords: Sheet metal forming, Hardening, Finite element analysis, Plasticity Modeling.