

ÇAPRAZ KAMA HADDELEME İŞLEMİNİN SONLU ELEMANLAR SİMULASYONU VE PARAMETRİK ÇALIŞMASI

Metin ÇAKIRCALI

*İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü,
Makina Mühendisliği Bölümü, Dinamik
Test ve Modelleme Laboratuvarı,
Gülbahçe, Urla, İzmir,*

Cenk KILIÇASLAN,

Mustafa GÜDEN*,

Bülent YARDIMOĞLU

*İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü,
Makina Mühendisliği Bölümü,
Dinamik Test ve Modelleme Laboratuvarı,
Gülbahçe, Urla, İzmir*

Valery Y. SHCHUKİN,

Vladimir V. PETRONKO

*Physical Technical Institute, National
Academy of Science, Minsk, Belarus*

ÖZET

AISI 1045 çeliğinin çapraz kama haddeleme (ÇKH) işleminde şekillendirme açısı, genişletme açısı ve alan indirgemesinin iş parçasında oluşan sıcaklık, efektif gerinim, efektif gerilme ve üç eksenli gerilme parametresi dağılımlarına olan etkisi ısıl-mekanik analizlerle belirlenmiştir. Nümerik analizler deneysel ölçülen kalıp kuvvetleri ile doğrulanmıştır. Analizler, iş parçası üzerindeki sıcaklığın işlem sırasında homojen dağılmadığını göstermiştir. Çalışılan proses parametre aralığında alan indirgemesinin ve genişletme açısının kalıp kuvvetlerinin, gerinim ve gerilmeler üzerinde en etkin işlem parametreleri olduğu görülmüştür. Analizler, üç eksenli gerilme parametresinin kırılma parametresi olarak alındığında ÇKH işlemi esnasında oluşacak ilk çatlakların kesme-yönlendirme bölgesinde iş parçasının orta kesitinin her iki tarafında oluşacağını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çapraz kama haddeleme, SEM, simülasyon

Finite Element Simulation Of The Cross Wedge Rolling Process and Parametric Study

ABSTRACT

The effect of process parameters including forming angle, stretching angle and area reduction on the CWR of AISI 1045 steel work piece temperature, effective strain, effective stress and stress triaxiality distribution was investigated numerically using thermo-mechanical model analysis. The numerical simulations were further validated by the experimentally measured tool forces. The temperature distribution in the work piece was shown to be non-uniform during CWR process. The most significant process parameters on the tool force, strain and stress of the work piece in CWR were shown, for the studied range of parameters, to be the area reduction and stretching angle. The models showed that when the stress triaxiality parameter was taken as the failure criterion, the crack would form at both sites of the work piece middle cross-section.

Keywords : Cross wedge rolling, FEM, simulation

* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 24.08.2010

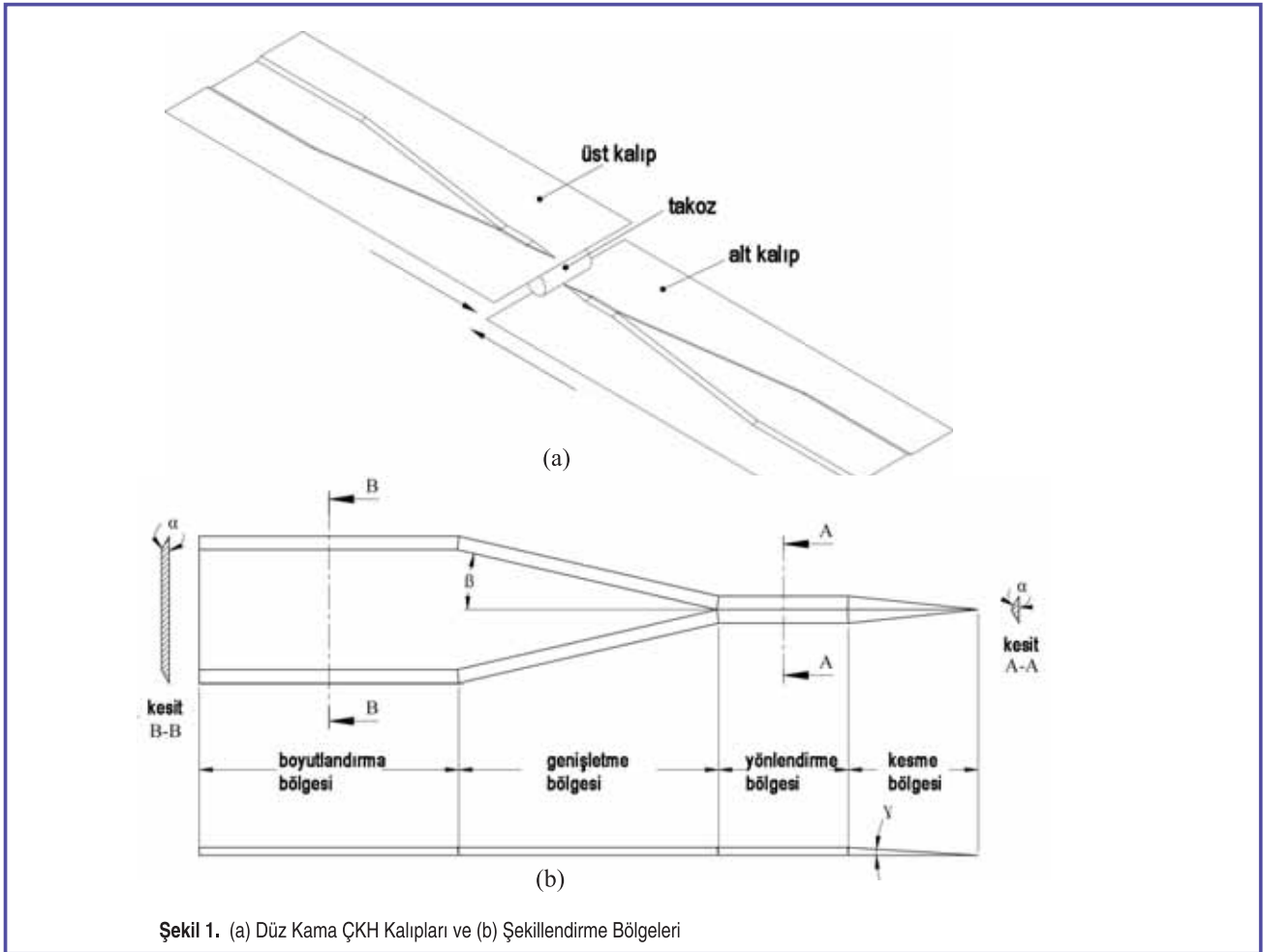
Kabul tarihi : 28.09.2010

GİRİŞ

Çapraz kama haddeme (ÇKH), iş parçasına teğet fakat birbirine karşı hareket eden düz plakalar ya da merdaneler üzerine oluşturulmuş iki adet kama arasındaki silindirik iş parçasının adımlı aksel parçalara dönüştürüldüğü bir plastik şekillendirme işlemidir. Çapraz kama haddemenin geleneksel şekillendirme işlemlerine göre avantajları şu şekilde sıralanabilir [1-4]; (i) düşük işletim maliyeti, (ii) yüksek üretim miktarları ve düşük hammadde maliyeti, (iii) hammadde tasarrufu (iş parçası uc kesimi ve gerekirse taşlama sonrası atılan hammadde %10'dan daha azdır), (iv) iyi ürün kalitesi (metal mikro yapısı sürekli ve incedir) ve (v) çevreye daha az zararlı madde atımı (proses yağlama akışkanlarına gerek duymaz). Bahsedilen önemli avantajlarına rağmen, ÇKH işlemi metal şekillendirme endüstrisi tarafından yaygın kullanılmamaktadır. Bunun temel nedeni iş parçası deformasyonu, sürtünme ve hasar mekanizması hakkında yeterli teknik bilgiye sahip olunmaması ve kalıp tasarımının karmaşık olmasıdır. Kalıp ile iş parçası arasındaki etkileşim kesin ve güvenilir olarak

belirlenemediğinden ÇKH işleminin otomasyonu da zordur. Tek bir ürün tasarımı için pek çok deneme yapılmalıdır. Bu tür tasarım teknikleri tecrübe ve deneme yanılma yöntemini temel alır ki bu çoğu zaman güvenilmeyen, zaman kaybettirici ve pahalı bir işlemdir [4].

ÇKH işleminde, kama üzerinde iş parçasının şekillendiği dört bölge vardır (Şekil 1b). Kesme bölgesinde silindirik iş parçası çevresine v-şeklinde yiv açılır. Yönlendirme bölgesinde oluşturulan v-şeklindeki yiv iş parçası çevresince düzgün devam eder, kama profili değişmez. Alan indirgemesi ($\Delta_A=100[1-(d_0/d)^2]$) veya indirgeme oranı ($\delta=d_0/d$) (d_0 ilk çap ve d ise son çaptır) sabittir ve işlem sonuna kadar değişmez. Genişletme bölgesinde kalıp üzerindeki kama genişliği artar ve iş parçası genişletme açısı (β) ile uçlara doğru açılır. İş parçası omuzlarda şekillendirme açısı (α) ile deforme olur. İş parçasının son şeklini aldığı son bölge boyutlandırma bölgesidir. Boyutlar ve yüzey kalitesi bu bölgede kontrol edilir. Bu bölgede genişletme açısı sıfırdır ve kama profili değişmez. Boyutlandırma bölgesi sonunda yer alan kesiciler iş parçasını uçlardan keserek fazlalıklar atılır.



Şekil 1. (a) Düz Kama ÇKH Kalıpları ve (b) Şekillendirme Bölgeleri

Çapraz kama haddeleme işleminde birçok hasar mekanizması mevcuttur. Oluşan hasarlar üç genel gruba ayrılmıştır [5]. Bunlar: (i) aşırı kayma, (ii) yüzey kusurları (boyun verme, spiral yivler ve katlanma) ve (iii) içsel boşluklardır. Kayma kalıp ilerlemesi ile iş parçası devri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Aşırı kayma iş parçasının hizalanmasını bozarak çarpık kesitli ve hatalı şekillendirmeye neden olmaktadır. Kayma ÇKH işleminde kademeli olarak artmaktadır [4]. Sürtünme sabitine oldukça duyarlı olan kayma, sürtünmenin kritik bir değere kadar artması (0,3) ile azalmaktadır [4, 6]. Boyun verme hasarı iş parçasının orta bölgesinin aşırı incelmelerinden kaynaklanmaktadır. Boyun verme iş parçasının herhangi bir bölgesindeki gerilmenin maksimum normal çekme gerilmesinin üstüne çıkması ile oluşur ve bu durumda iş parçası akışı kırılmaya kadar devam eder. Boyun verme çekme testinde olduğu gibi çekme gerilmesinin en yüksek olduğu iş parçasının orta kısmında oluşur. Boyun verme, şekillendirme ve genişletme açısı ve alan indirgemesinin artmasıyla artar [7]. Spiral yivler iş parçası yüzeyinde çatlakların açılmasıyla oluşur. Bu kusur sürtünme kuvvetlerinin yüksek olduğu işlemlerde görülmektedir [2]. Katlanma radyal yönde malzeme akışının artmasıyla oluşur ve keskin şekillendirme açılarındaki iş parçası kesiti elips şeklini alır [7]. İçsel boşluk oluşumu iş parçasını zayıflatan ve kırılmaya neden olan bir hasardır. İçsel boşluk oluşumu gözle fark edilemez; belirlenmesi için tahribatsız muayene tekniklerinin kullanılmasını gerektirir. ÇKH işleminde iki tip içsel kusur bilinmektedir: İş parçası orta kesitinde dairesel ve merkez boyunca uzanan çapraz şeklindeki kırıklardır [6]. Mikro yapıdaki iç boşluklar devamlı değil ise bunlar Mannesmann kusuru olarak adlandırılırlar [1]. İç boşluk ve çatlak oluşumu başlangıcının nedenleri şunlardır; (i) iş parçası boyunca oluşan yüksek çekme gerilmeleri, (ii) kesme bölgesindeki aşırı kesme gerilmeleri ve (iii) alçak yorulma dayanımı olarak bildirilmiştir [8-10]. Ortalama gerilme, efektif gerilme ve efektif kırılma gerinimi kırılma kriteri olarak araştırılmış ve efektif kırılma geriniminin kırılma limit kriteri olarak ÇKH işleminde belirleyici olduğu bildirilmiştir [9].

Literatürde ÇKH işlemini sonlu elemanlar yöntemi ile inceleyen birçok çalışma vardır. Li ve Lovell [9] ÇKH işleminde boşluk oluşumu ve ilerlemesini deneysel ve ANSYS/LSDYNA programları ile incelemişlerdir. Boşluk oluşum morfolojisi, iş parçası malzemesi, şekillendirme açısı, genişletme açısı ve alan indirgemesinin fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Deng vd. [11] ÇKH işleminde kayma ve işlem değişkenleri arasındaki ilişkiyi ANSYS/LSDYNA programlarını kullanarak araştırmışlardır. Üç farklı iş parçası malzemesi (1100 alüminyum, 1018 çelik ve C21000 pirinç) için farklı şekillendirme hızı (0,4 ve 4,0 m s⁻¹), alan indirgemesi (25, 40 ve 55) ve şekillendirme açılarındaki (20°, 30° ve 40°) oluşan kayma incelenmiştir. Analizlerde sabit

statik (0,5) ve dinamik (0,46) Coulomb sürtünme katsayıları (μ) kullanılmıştır. Şekillendirme hızı, alan indirgemesi ve şekillendirme açısının kaymayı etkileyen önemli değişkenler olduğu belirlenmiştir. Fang vd. [12] DEFORM-3D programı ile ÇKH işlemini modellemişlerdir. Artan genişletme açısı ile teğet kuvvetlerin arttığı ancak dikey kuvvetlerin azaldığı gösterilmiştir. Wang vd. [13] AISI 5140 çeliğinin ÇKH işlem detaylarını, DEFORM-3D programında ısıl-mekanik model ile mikro yapı analizini birleştirerek belirlemişlerdir. En yüksek efektif gerinim iş parçasının merkezinde ve en yüksek gerinim hızının ise temas yüzeyindedir. Zhao vd. [14] ANSYS/LS-DYNA programı ile 1045 çeliğinin ÇKH işlemini modellemişlerdir. İş parçası merkezinde yüksek yanal çekme gerilmelerinin oluştuğu gösterilmiştir. Xiong vd. [15] ÇKH işleminde iş parçası kesitindeki efektif gerinim ve gerinim hızı değişimini DEFORM-3D simülasyon programı kullanarak farklı iş parçası kesitlerinde haddeleme zamanına karşılık belirlemişlerdir. Merkezden 1/4 R (R iş parçası yarı çapı) uzunluktaki bölgede gerinimin 1/2 R uzaklıktaki bölgeye ve merkeze kıyasla daha hızlı arttığı gösterilmiştir. Genişletme bölgesinde gerinimin hızla artması 1/4 ve 1/2 R kesitinde periyodik dalgalanmalara sebep olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde 1/4 ve 1/2 R kesitlerinde gerinim hızının merkezden daha yüksek olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışma, ÇKH üzerine yapılan çalışmaların ötesinde daha detaylı deneysel ve modelleme çalışmalarını kapsamının yanında, modellemede kullanılan malzeme özelliklerinin yüksek deformasyon hızlarında belirlenmesini ve dolayısıyla daha hassas modelleme sonuçlarının elde edilmesini hedeflemiştir. Isıl mekanik simülasyonlardan elde edilen teğet kalıp kuvvetleri deneysel kuvvetlerle doğrulandıktan sonra parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışmada kalıbın geometrik değişkenlerinin (β ve α açıları), ve alan indirgemesinin kalıp kuvvetlerine, iş parçasında oluşan sıcaklık, efektif gerinim, efektif gerilme ve üç eksenli gerilme parametresi dağılımlarına olan etkisi incelenmiştir.

MALZEME MODELLERİ

Çalışılan malzemenin deformasyon davranışları Johnson ve Cook (JC) gerilme malzeme [16] modeli ile belirlenmiştir. Bu model aşağıda verilmiştir;

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^n \right) \left(1 + c \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - T^{*m} \right) \quad (1)$$

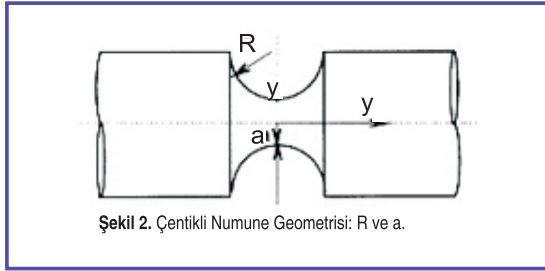
Denklem 1'de, σ , ε ve $\dot{\varepsilon}$ sırasıyla, efektif gerilme, efektif gerinim ve efektif gerinim hızıdır. A, B, n, c, m model sabitleri ve $\dot{\varepsilon}_0$ referans efektif gerinim hızıdır. T* aşağıdaki denklem ile ifade edilir;

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

Burada T , T_r ve T_m sırasıyla sıcaklık ve referans ve ergime sıcaklığıdır. İş parçasında kırılmaya neden olabilecek üç eksenli gerilme parametresi aşağıda verilen denklem ile ifade edilir [17]:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_h}{\sigma} = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right) \quad (3)$$

Denklem 3'te σ_h ortalama gerilme, R çentik yarıçapı ve a ise numunenin boyun yarıçapıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Çentikli Numune Geometrisi: R ve a.

Çalışmada kullanılan çeliğin 900-1200 °C sıcaklığı ve 0,1-100 s⁻¹ gerinim hızları aralığındaki ASM Materials Handbook'daki

Tablo 1. AISI 1045 Çeliği JC Model Parametreleri

Malzeme modeli	A (MPa)	B (MPa)	c	n	m	$\dot{\epsilon}_0$	T_r (°C)
AISI 1045 JC-1	105,84	198,61	0,085	0,331	0,52	1	900
AISI 1045 JC-2	451	706	0,018	0,331	0,52	0,001	25

[18] gerçek basma gerilme-gerinim verileri kullanılarak JC model parametreleri belirlenmiştir. Bu model 1045 JC-1 modeli olarak adlandırılmıştır. Ayrıca 1045 çeliğinin oda sıcaklığında JC malzeme modeli de belirlenmiş [19] ve bu model 1045 JC-2 modeli olarak adlandırılmıştır. Numunelerin yüksek gerinim hızlarındaki testleri 316 L paslanmaz çelik çubuklu çekme Split Hopkinson Basınç Bar test düzeneği ile 250-1500 s⁻¹ gerinim hızları aralığında yapılmıştır. Belirlenen JC-1 ve JC-2 malzeme model parametreleri Tablo 1'de listelenmiştir. JC-2 modelinde, m değeri yüksek sıcaklıkta belirlenmiş olan JC-1 modelindeki m değeri ile aynı alınmıştır.

ÇAPRAZ KAMA HADDELEME DENEYLERİ

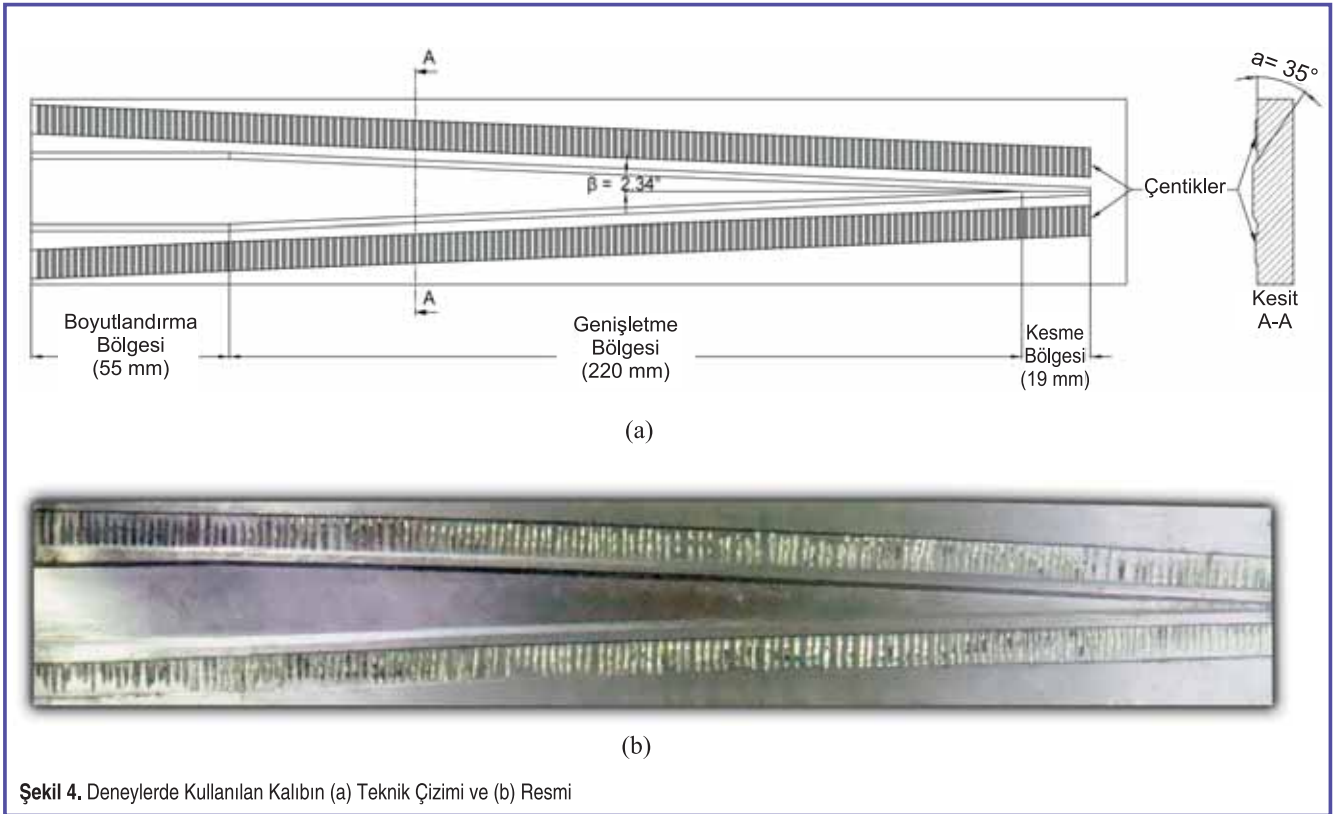
Deneyel çalışmalar Belarus Ulusal Bilim Akademisi Fizik Teknik Enstitüsündeki ÇKH makinesinde yapılmıştır. Şekil 3'te deneylerde kullanılan ÇKH makinesi görülmektedir. Kullanılan ÇKH makinesi özellikleri şöyledir:

İtme kuvveti: 10 ton, maksimum kalıp hızı: 25 m s⁻¹, iş parçası çapı ve uzunluğu: 6-50 mm ve 400 mm, maksimum üretim (saat): 600 parça ve kalıp ömrü: 500.000 iş parçası. Malzeme modeli parametrelerinin doğrulanması için ÇKH deneylerinde kullanılan düz kama tipi kalıp Şekil 4'te gösterilmektedir. Deneyde, alt kalıp sabitken üst kalıp yatay yönde 235,2 mm s⁻¹ hız ile hareket etmektedir. Bu hızda toplam ÇKH işlemi süresi 1,25 saniyedir. Deneylerde kullanılan kalıbın geometrik özellikleri şöyledir: $\alpha=35^\circ$, $\beta=2,35^\circ$, $\Delta_A=25,68$ (18 mm çaplı iş parçası, $\delta=1,16$), kesme bölgesi uzunluğu=19 mm, genişletme bölgesi uzunluğu=220 mm ve boyutlandırma bölgesi uzunluğu=55 mm'dir. Kalıplara zarar vermemek için deneylerde düşük alan indirgemesi ve düşük genişletme açısı kullanılmıştır. İş parçasının çapı ve uzunluğu sırasıyla 18 ve 60 mm'dir ve ÇKH işlemi öncesi endüksiyon fırınında 5 dakika süreyle 750 °C ve 1050 °C'ye ısıtılmıştır.

İş parçasına teğet yöndeki kalıp kuvvetlerinin ölçülmesinde hidrolik silindir üzerine bağlı bir basınç ölçer kullanılmıştır. Basınç ölçer değerleri saniyede 30 kare kayıt yapan bir video kamera ile kaydedilip daha sonra bir video programı kullanılarak zamana karşılık teğet kuvvetler hesaplanmıştır.



Şekil 3. Deneylerde Kullanılan ÇKH Makinesi

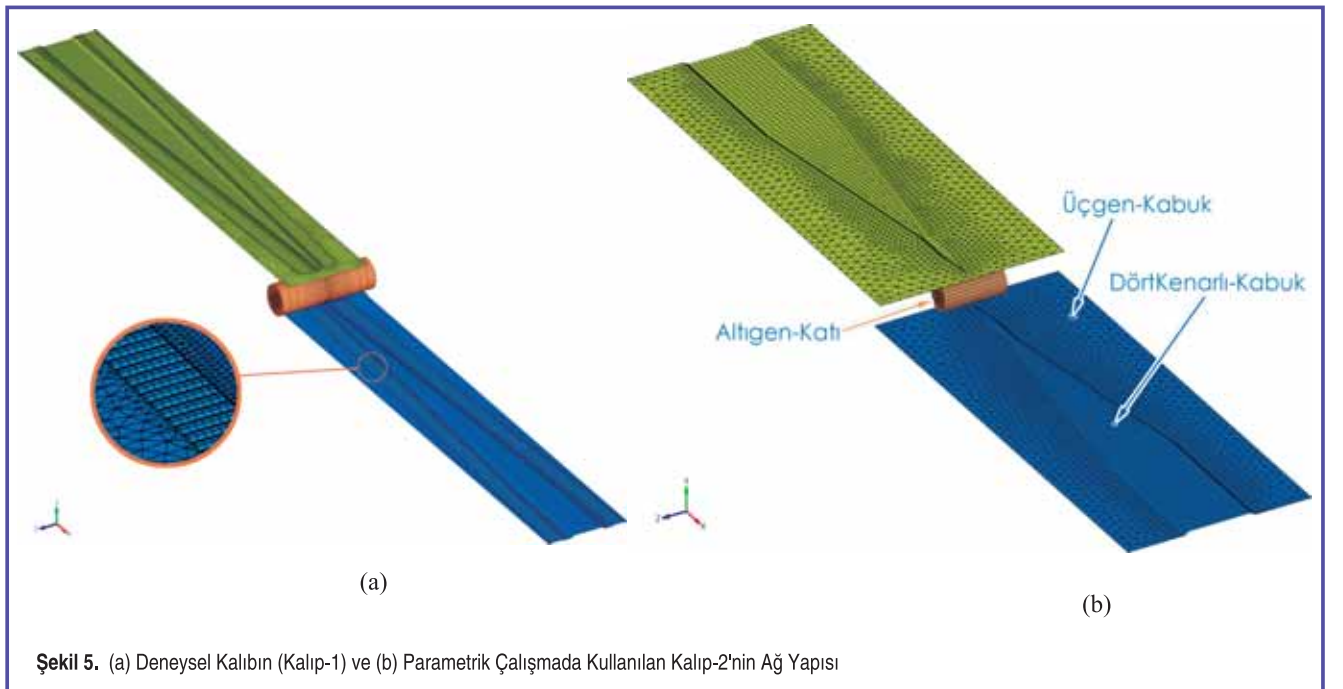


Şekil 4. Deneysel Kalıbın (a) Teknik Çizimi ve (b) Resmi

MODELLEME

Modellerde iki farklı kalıp oluşturulmuştur: Deneysel doğrulama için Kalıp-1 ve parametrik çalışma için Kalıp-2. Deneysel doğrulama için oluşturulan ÇKH modelinde kamalar ve çentikler, sonuçların doğruluğunu arttırmak

amacıyla sık elemanlara ayrılmıştır (Şekil 5(a)). Kalıp üzerinde sık ağ yapısının kullanılmasının temel nedeni elemanların nüfus etmesini engellemektir. Rijit gövdeler (kalıplar) için temas algoritması küçük elemanların kullanılmasını gerektirmektedir. Şekil 5(a)'da gösterildiği



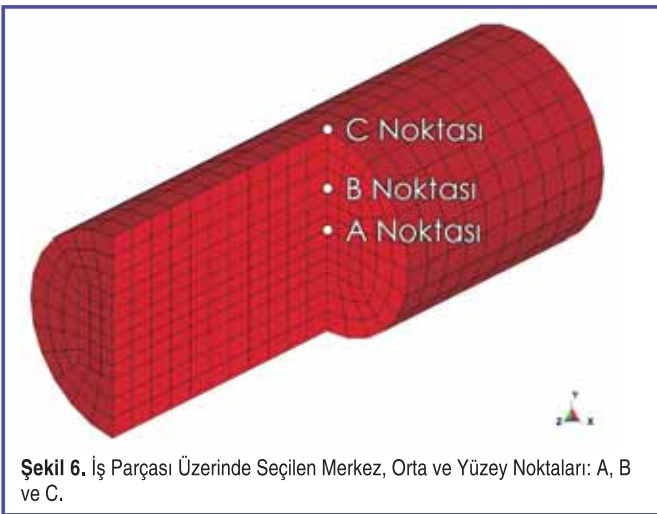
Şekil 5. (a) Deneysel Kalıbın (Kalıp-1) ve (b) Parametrik Çalışmada Kullanılan Kalıp-2'nin Ağ Yapısı

üzere Kalıp-1'de boyutu değişken karışık (üçgen ve dörtkenarlı) kabuk elemanlar kullanılmıştır. Şekil 5(b)'de parametrik analizlerde kullanılan Kalıp-2'nin sonlu elemanlar ağ yapısı gösterilmektedir. Ağda üçgen ve dört kenarlı kabuk elemanlar kullanılmıştır. Dört kenarlı kabuk elemanlar (4-düğüm) basit yüzeylerde üçgen kabuk elemanlar (3-düğüm) ise daha karmaşık yüzeyler için kullanılmıştır. Kalıp-1, toplam 39.886, Kalıp-2 ise toplam 6772-7142 kabuk elemanı içermektedir. İş parçasının sonlu elemanlar ağı 8-düğümlü altıgen katı elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Deneysel doğrulama için kullanılan iş parçası toplam 13.284, parametrik çalışmada kullanılan iş parçasında ise toplam 2268 adet katı eleman kullanılmıştır. Deneysel doğrulama için oluşturulan modelde iş parçasının orta kısmı ana deformasyon bölgesi olduğundan bu alanda daha sık ağ yapısı kullanılmıştır. Parametrik analizler için çok sayıda farklı simülasyon gerçekleştirileceği için hesaplama zamanı iş parçasının sonlu elemanlar ağının yoğunluğunun azaltılması ile düşürülmüştür.

Sonlu elemanlar hesaplamaları LS-DYNA V971 R4.2.1 (R4.53450) programı ile gerçekleştirilmiştir. Isıl-mekanik analizler "implicit" (ısı için) ve "explicit" (mekanik için) metodlarının birleştirilmesi ile çözülmüştür. Isıl özellikler "thermal-isotropic" malzeme modeli ile tanımlanmıştır. İş parçası (deforme olabilir, köle) ile kalıplar (rijit, efendi) arasındaki etkileşimi tanımlamak için "yüzeyden yüzeye" temas algoritması kullanılmıştır. Temas algoritması penaltı metodu ile kayan ara yüzeyler üzerine kurulmuştur. Modelde sürtünme katsayıları Coulomb formülasyonuna göre tanımlanmıştır [20]. Bu formülasyonda sürtünme katsayıları temas yüzeylerin hızına (V_{rel}) bağlıdır;

$$\mu = FD + (FS - FD)e^{-DC|V_{rel}|} \quad (4)$$

Burada, FD dinamik sürtünme katsayısı, FS statik sürtünme katsayısı ve DC ise üstsel bozulma katsayısıdır.



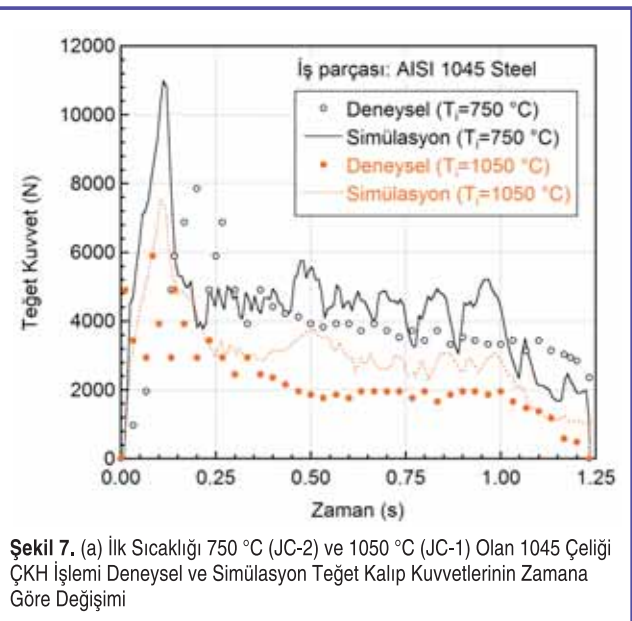
Şekil 6. İş Parçası Üzerinde Seçilen Merkez, Orta ve Yüzey Noktaları: A, B ve C.

Çalışılan çeliğin parametrik analizinde kullanılan değişkenler şöyledir: Şekillendirme açısı (α): 30°, 35° ve 40°, genişletme açısı (β): 7°, 8° ve 10° ve yüzde alan indirgemesi (Δ_x): 31,75, 38,75, 45,36 ve 51,60. Parametrelerin iş parçası şekillenmesi üzerine etkisi orta kesitte merkez, orta ve yüzey noktaları için belirlenmiş olup sırasıyla A, B ve C noktaları olarak gösterilmektedir (Şekil 6). Parametrik çalışmada iş parçası ilk sıcaklığı 1000 °C alınmıştır ve JC-2 malzeme modeli kullanılmıştır. Silindirik 1045 çeliği iş parçasının ilk çapı 24 mm'dir. Modelde üst ve alt kalıplar birbirine doğru her biri 0,86 m s⁻¹ olmak üzere toplamda 1,72 m s⁻¹ hız ile hareket etmektedir. Belirlenen kalıp hızları hâlihazırda kullanılan ÇKH işlemlerindeki hızlarla (1-2 m s⁻¹) uyumludur. Kalıplar iş parçasına alttan ve üstten normal yönde 0,5 mm, toplamda ise 1 mm basmaktadır. Parametrik çalışmada kalıplar ile uygulanan basma kuvveti gerçek ÇKH işleminde iş parçasının kalıp üzerine yerleştirilmesi için kullanılan çentik etkisini simüle etmektedir.

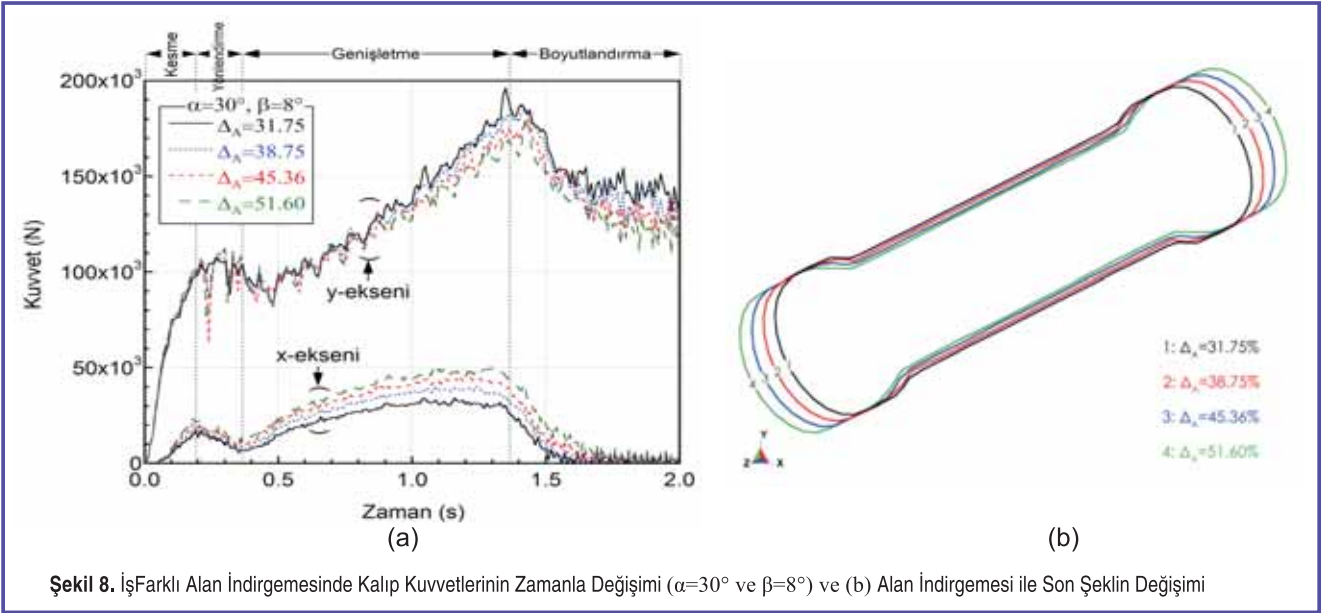
BULGULAR

Şekil 7'de 750 ve 1050 °C'de Kalıp-1 ile ÇKH işlemine tabii tutulan 1045 çeliğinin deneysel ve simülasyon teğet kalıp kuvvetlerinin zamana göre değişimi gösterilmektedir. Modelde statik ve dinamik sürtünme katsayıları 0,5 alınmıştır. İlk sıcaklığı 1050 °C olan numunenin simülasyonunda 1045 çeliği JC-2 malzeme modeli ve ilk sıcaklığı 750 °C olan numunenin simülasyonunda ise 1045 çeliği JC-1 malzeme modeli kullanılmıştır. Aynı şekilde görüldüğü gibi deneysel ve simülasyon sonuçları 750 °C'de uyum gösterirken 1050 °C için simülasyon sonuçları deneyselden daha yüksek çıkmıştır.

Alan indirgemesinin teğet ve dikey kuvvetler (P_x , P_y) üzerine etkisi Şekil 8(a)'da sabit şekillendirme ve genişletme açıları

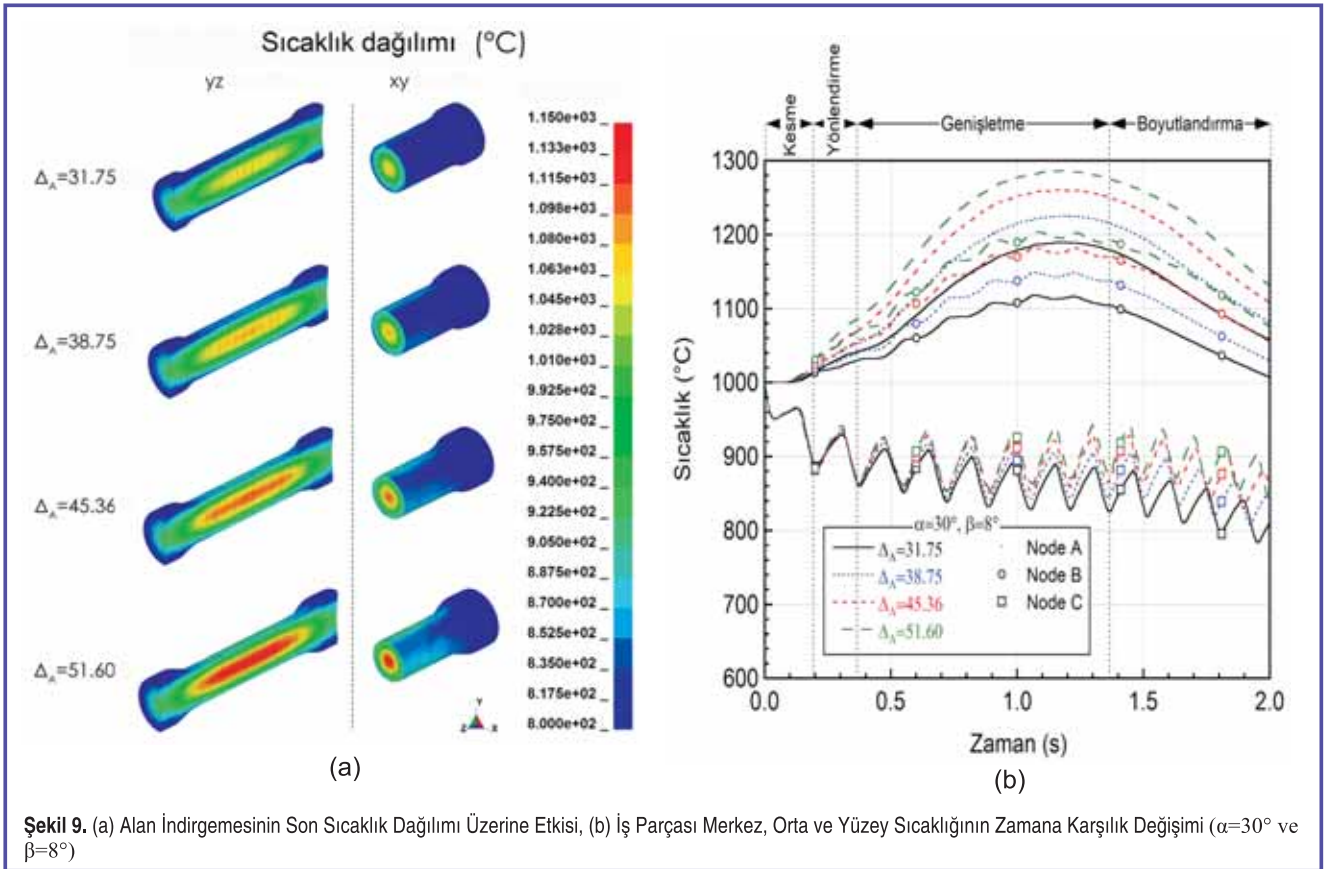


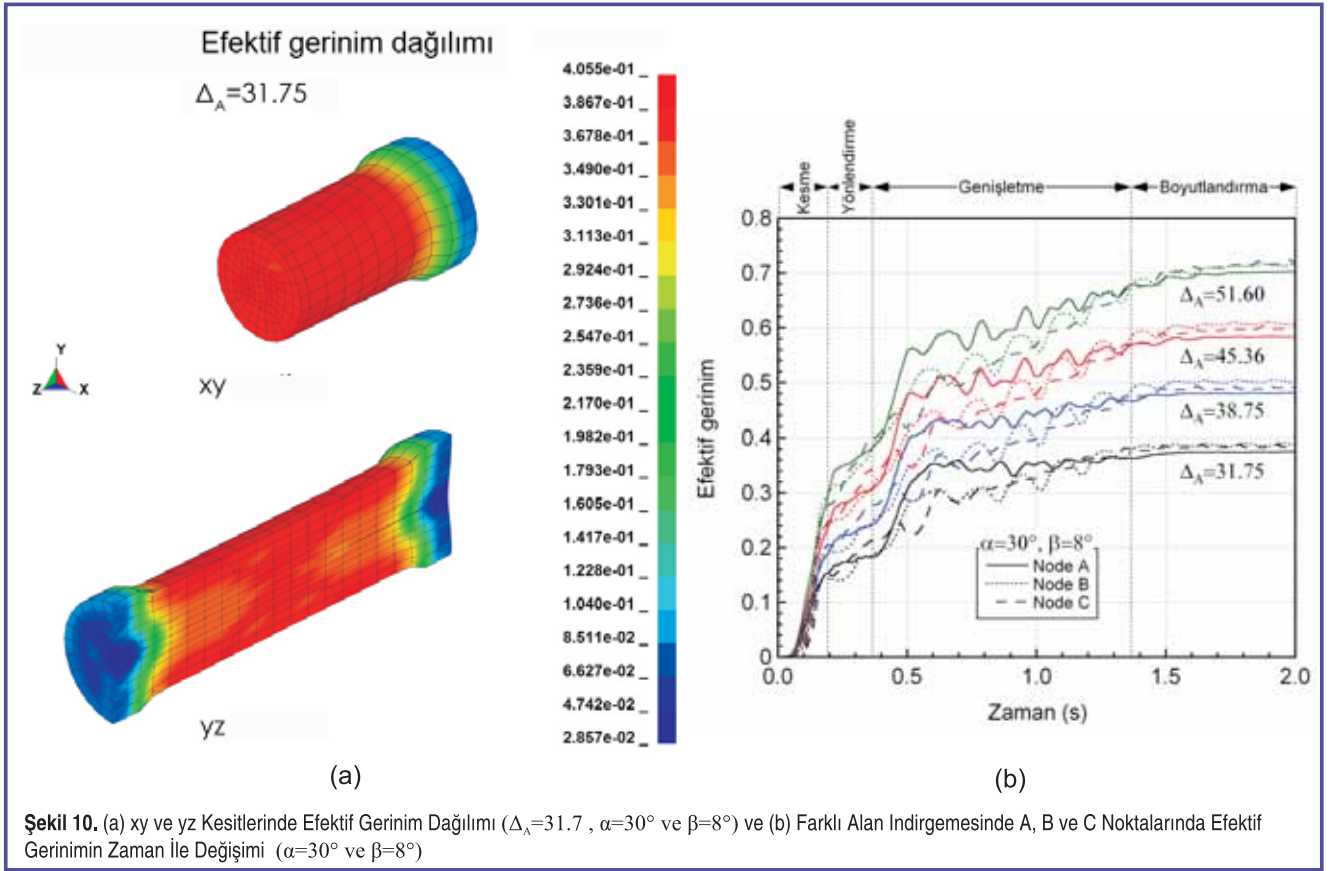
Şekil 7. (a) İlk Sıcaklığı 750 °C (JC-2) ve 1050 °C (JC-1) Olan 1045 Çeliği ÇKH İşlemi Deneysel ve Simülasyon Teğet Kalıp Kuvvetlerinin Zamana Göre Değişimi



inçin gösterilmektedir. Her iki kuvvet kesme bölgesinde artmakta ve yönlendirme bölgesinde ise kademeli olarak azalmaktadır. Kuvvetler genişletme bölgesinde tekrar artmakta ve boyutlandırma bölgesinde tekrar düşmektedir. Alan indirgemesinin kuvvetler üzerine etkisi en çok

genişletme bölgesinde görülmektedir. Şekil 8(b)'de son şeklin alan indirgemesi ile değişimi gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi alan indirgemesinin artması ile iş parçasının son boyu artmaktadır.





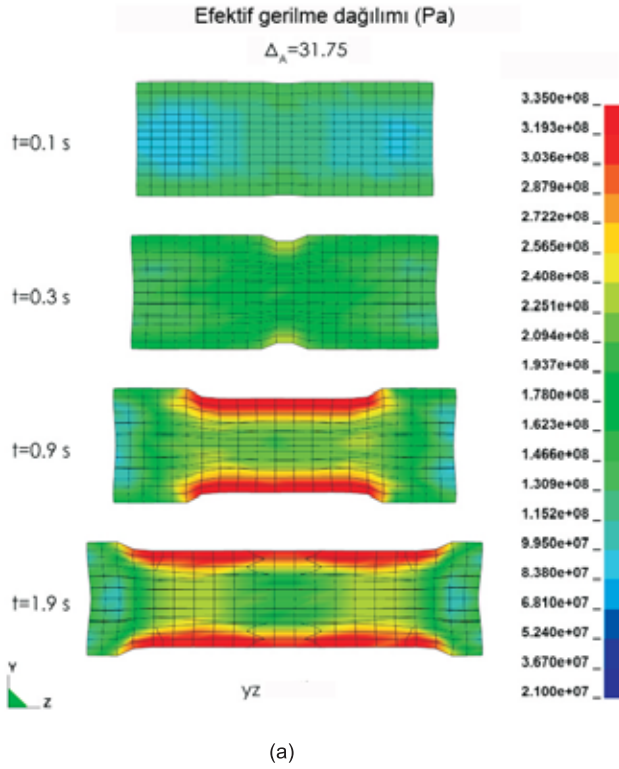
Alan indirgemesinin iş parçasının son sıcaklık dağılımı üzerine etkisi Şekil 9(a)'da yz ve xy kesitleri için gösterilmektedir. Artan alan indirgemesi iş parçasının orta bölgesi sıcaklığını arttırmaktadır. Şekil 9(b)'de iş parçası merkez, orta ve yüzey elemanları sıcaklıklarının zamana karşılık değişimi gösterilmektedir. Alan indirgemesine bağlı olarak iş parçası yüzey sıcaklığı 1000 °C'den 800-900 °C'ye kadar düşmektedir. Yüzeydeki sıcaklık dalgalanmaları iş parçasının kalıp ile temas etmesi ve teması kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. İş parçası merkez ve orta noktası sıcaklığı genişletme bölgesinde en yüksek değere çıkmakta ve boyutlandırma bölgesinde ise düşmektedir (Şekil 9(b)).

Şekil 10(a)'da 31,75 alan indirgemesinde xy ve yz kesitinde efektif gerinim dağılımı gösterilmektedir. En yüksek efektif gerinim değerlerinin iş parçasında genişletme bölgesinde oluşmaktadır. Şekil 10(b)'de ise iş parçası merkez, orta ve yüzeydeki efektif gerinimin zamanla değişimi gösterilmektedir. Şekil 10(b)'de görüldüğü üzere kesme bölgesinde gerinim hızla artmakta, yönlendirme ve genişletme bölgesinde artış hızı nispeten azalmakta ve boyutlandırma bölgesinde ise sabit kalmaktadır.

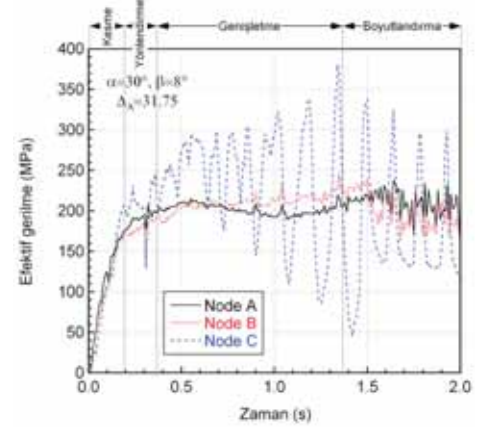
İş parçası yz kesitinde, 31,75 alan indirgemesinde oluşan efektif gerilme dağılımı Şekil 11(a)'da gösterilmektedir. En yüksek gerilme genişletme bölgesinde iş parçası yüzeyinde

oluşmaktadır. Şekil 11(b)'de sırasıyla 31,75 alan indirgemesi için A, B ve C noktalarındaki efektif gerilmenin zamanla değişimi gösterilmektedir. Kesme bölgesindeki gerilme değerleri neredeyse doğrusal artarken genişletme bölgesinde sabit kalmaktadır. Şekil 11(b)'de görüldüğü üzere efektif gerilme yüzeyde dalgalanmalar göstermektedir. Alan indirgemesi arttığında efektif gerilme değerleri azalmaktadır. Alan indirgemesinin efektif gerilme üzerine etkisi en çok merkez noktada görülmektedir (Şekil 11(c)).

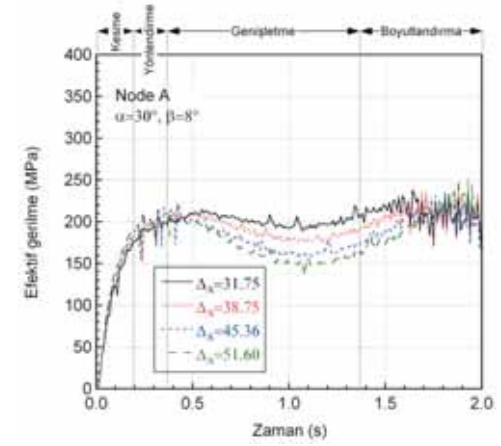
Farklı deformasyon zamanlarında iş parçası yz kesitindeki üç eksenli gerilme parametresi dağılımı Şekil 12(a)'da gösterilmektedir. Üç eksenli gerilme parametresi kesme ve yönlendirme bölgesinde iş parçasının uç kısımlarında ve genişletme bölgesinde ise uç ve merkezde en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Şekil 12(b)'de 31,75 alan indirgemesinde A, B ve C noktalarındaki üç eksenli gerilme parametresinin zamanla değişimi gösterilmektedir. Yüzeydeki üç eksenli gerilme parametresi kalıp ile iş parçasının teması ve temastan ayrılması sonucu pozitif ile negatif arasında dalgalanmıştır. Merkez noktadaki üç eksenli gerilme parametresi ise işlem boyunca pozitifdir. B noktasındaki üç eksenli gerilme parametresi kesme bölgesinde pozitifken takip eden diğer bölgelerde negatif olmaktadır. Kesme, yönlendirme ve genişletme bölgelerinde en yüksek üç eksenli gerilme parametresi değerleri yüzeyde ve merkezde gözlenmiştir. Alan



(a)



(b)



(c)

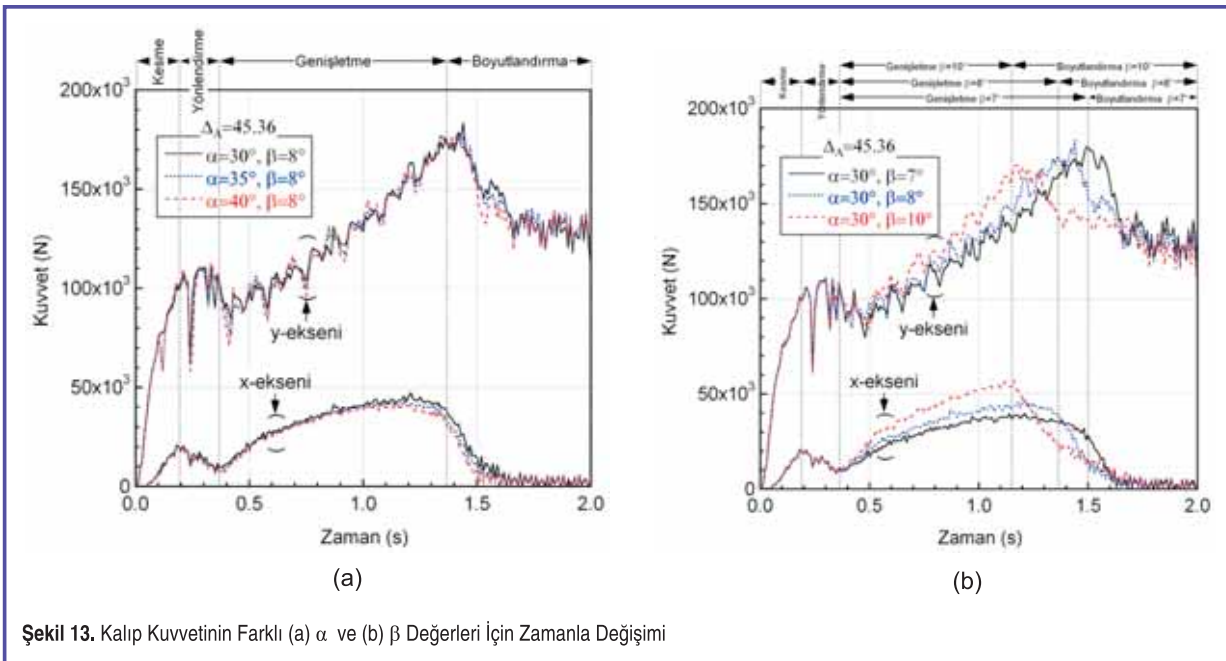
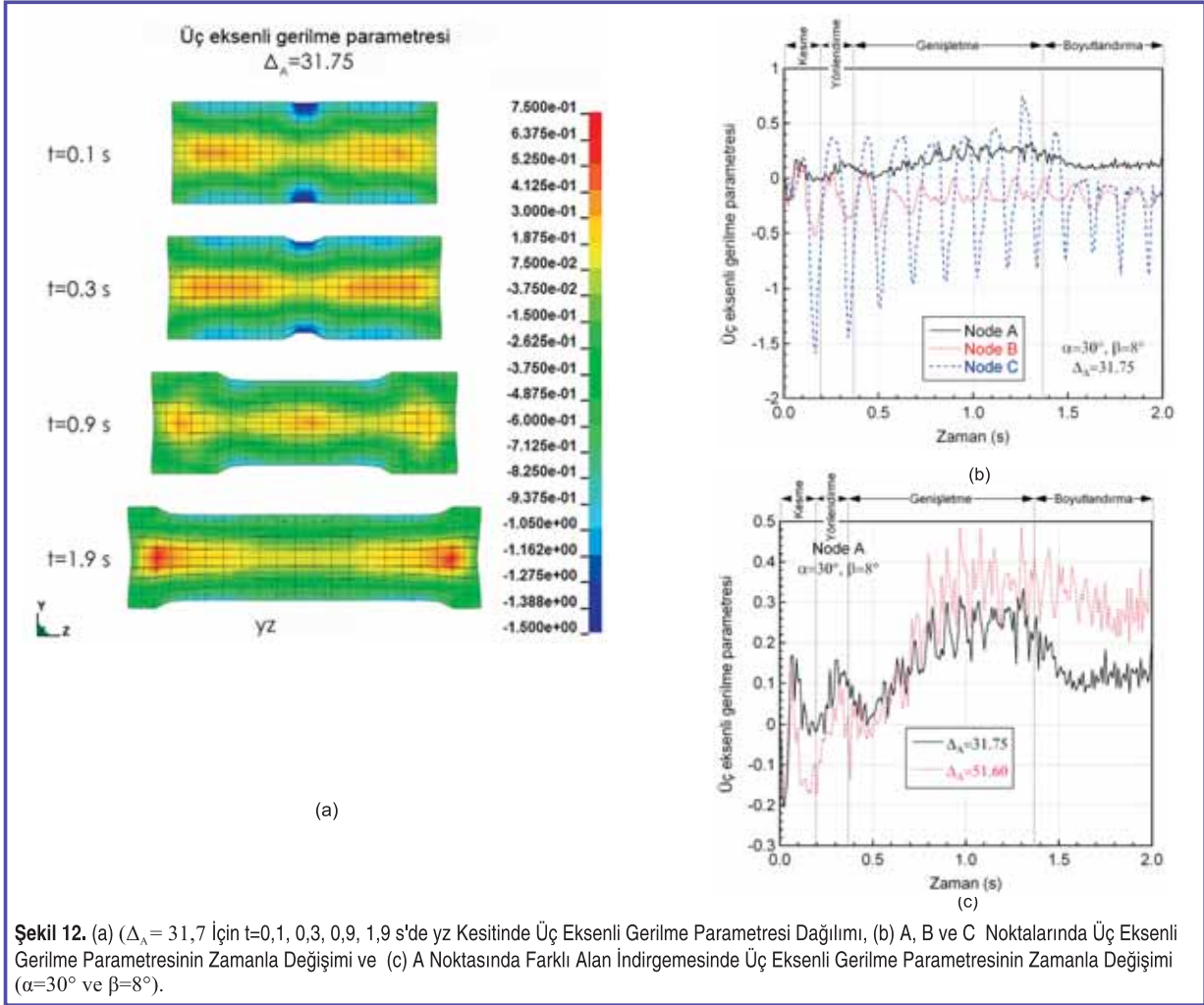
Şekil 11. (a) ($\Delta_A = 31,7$ için $t=0,1, 0,3, 0,9$ ve $1,9$ s'de yz Kesitinde Efektif Gerilme Dağılımı (b) A, B ve C Noktalarında Efektif Gerilmenin Zamanla Değişimi ve (c) Farklı Alan İndirgesinde Efektif Gerilmenin Merkez Noktada (A) Zaman ile Değişimi ($\alpha=30^\circ$ ve $\beta=8^\circ$).

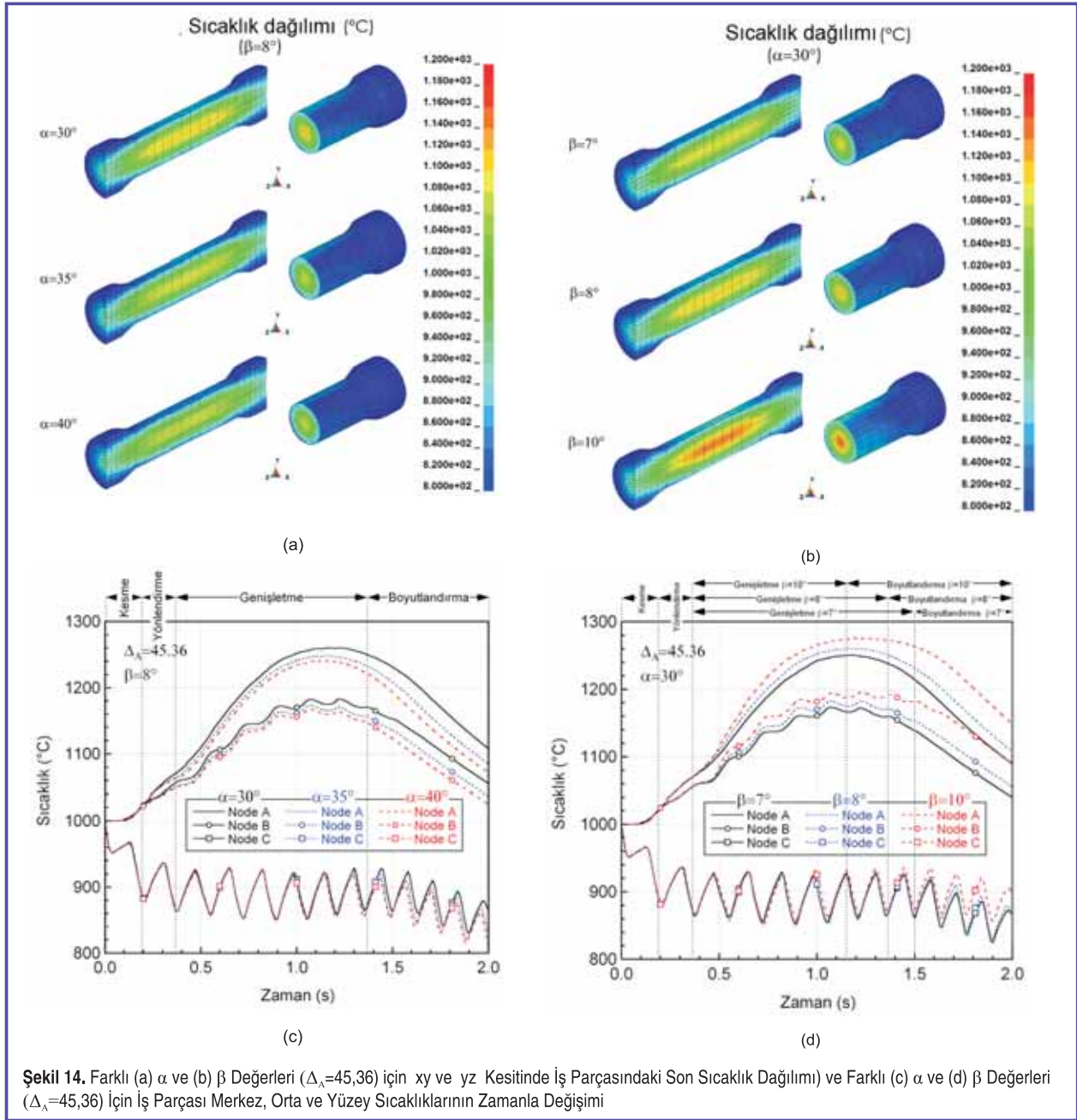
indirgeme oranının artması ile merkez noktasındaki üç eksenli gerilme parametresi kesme ve yönlendirme bölgelerinde düşmekte genişletme bölgesinin ortasından sonra ve boyutlandırma bölgesinde artmaktadır (Şekil 12(c)). Üç eksenli gerilme parametresi yönlendirme bölgesinin sonuna doğru artmakta, genişletme bölgesine geçiş bölgesinde düşmekte ve daha sonra genişletme bölgesinde ilerleyen zamanlarda yükselmektedir.

Şekil 13(a)'da $\beta=8^\circ$ ve $\Delta_A=45,36$ için α 'nın kalıp kuvvetleri üzerine etkisi gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere çalışılan α aralığında dikey yöndeki (y-ekseni) kuvvetler değişmemektedir. Teğet (x-ekseni) kuvvetler ise genişletme bölgesi sonunda α 'nın düşmesi ile çok az artmaktadır. Şekil 13(b)'de $\alpha=30^\circ$ ve $\Delta_A=45,36$ için β 'nin kalıp kuvvetleri üzerine etkisi gösterilmektedir. Aynı şekilde çalışılan β açısının değerlerinin teğet ve dikey yöndeki kalıp kuvvetlerini etkilediği görülmektedir. Genişletme bölgesinin başlangıcında β açısının artmasıyla dikey yöndeki kuvvetler

azalmaktadır. Sonraki işlem adımlarında düşük β değerindeki kalıp kuvvetleri yüksek β değerlerindeki daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi dikey yöndeki kuvvet profillerinin doğrusal olması ve düşük β açısı için genişletme bölgesinin daha uzun olmasıdır. Genişletme bölgesinin uzamasıyla dikey kuvvetler daha yüksek değerlere çıkmaktadır. Dikey yöndeki kalıp kuvveti parametrik çalışmada yapılan bütün simülasyonlar için en yüksek değerlerine genişletme bölgesi sonunda ulaşmıştır. Benzer durum β açısının teğet yöndeki kuvvetler üzerine etkisi için de geçerlidir. Artan β açısıyla teğet yöndeki kuvvetler azalmaktadır ve en yüksek değerlere genişletme bölgesi sonunda ulaşılmıştır. Boyutlandırma bölgesinde her iki kuvvet de sabit kalmaktadır. Artan β açısıyla adiyabatik ısınma nedeniyle malzeme yumuşaması gerinim hızı sertleşmesinin üzerine çıkmakta ve maksimum kuvvet azalmaktadır.

Şekil 14(a)'da iş parçasının yz ve xy kesitlerinde oluşan son sıcaklık dağılımı artan α açısı ile $\Delta_A=45,36$ ve $\beta=8^\circ$ için



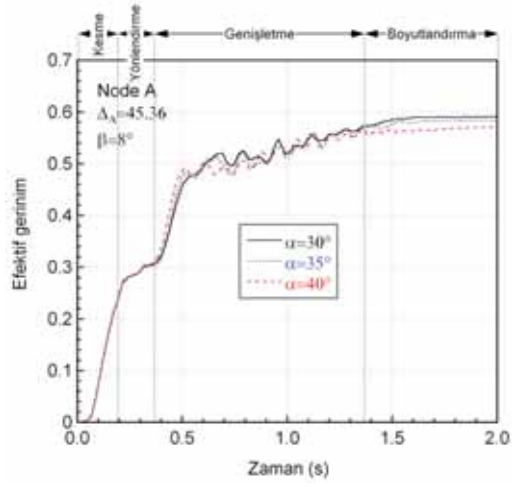


Şekil 14. Farklı (a) α ve (b) β Değerleri ($\Delta_A=45,36$) için xy ve yz Kesitinde İş Parçasındaki Son Sıcaklık Dağılımı ve Farklı (c) α ve (d) β Değerleri ($\Delta_A=45,36$) için İş Parçası Merkez, Orta ve Yüzey Sıcaklıklarının Zamanla Değişimi

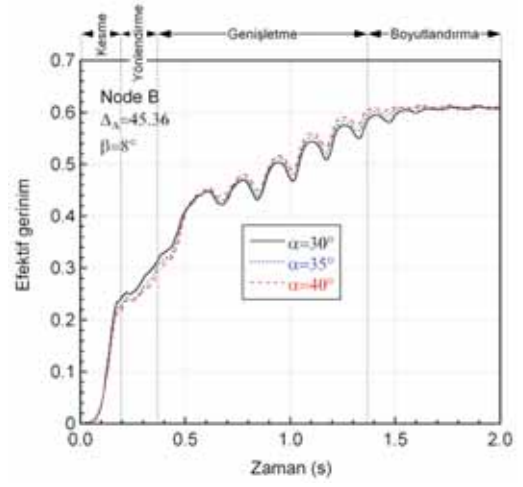
gösterilmektedir. En yüksek sıcaklık iş parçası orta bölgesinde gerçekleşmektedir. Şekillendirme açısı arttığı zaman iş parçasının son sıcaklığı azalmaktadır. Şekil 14(b)'de iş parçasının yz ve xy kesitlerinde oluşan son sıcaklık dağılımı artan β açısı ile $\Delta_A=45,36$ ve $\alpha=30^{\circ}$ için gösterilmektedir. Benzer şekilde en yüksek sıcaklık iş parçasının orta bölgesinde gerçekleşmektedir. Artan β açısı ile iş parçası son sıcaklık değeri yükselmektedir. Farklı α ve β açıları için iş parçası merkez, orta ve yüzey sıcaklıkların zamanla değişimi sırasıyla Şekil 14(c) ve (d)'de verilmiştir.

Artan α açısı ile merkez, orta ve yüzey sıcaklık değerleri düşmektedir (Şekil 14(c)). Merkez ve orta noktalar için, farklılıklar yönlendirme bölgesinde başlamakta ve işlem sonuna kadar devam etmektedir. Şekil 14(d)'de β açısının sıcaklık üzerine daha etkin olduğu görülmektedir. Artan β açısı ile sıcaklık artmaktadır. Merkez, orta ve yüzey sıcaklık farkları $\beta=7^{\circ}$, 8° ve 10° için sırasıyla 59, 50 ve 33,7 $^{\circ}\text{C}$ 'dir. Buna göre β en çok merkez noktasında (A noktası) etkindir.

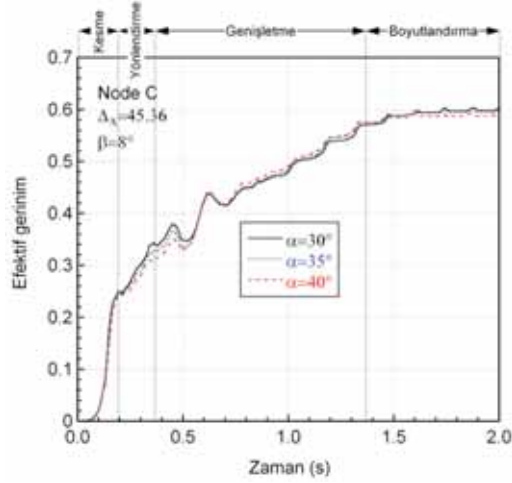
İş parçası merkez, orta ve yüzey noktalarındaki efektif gerinim farklı α ve β değerleri için sırasıyla Şekil 15(a-c) ve Şekil 15(d-



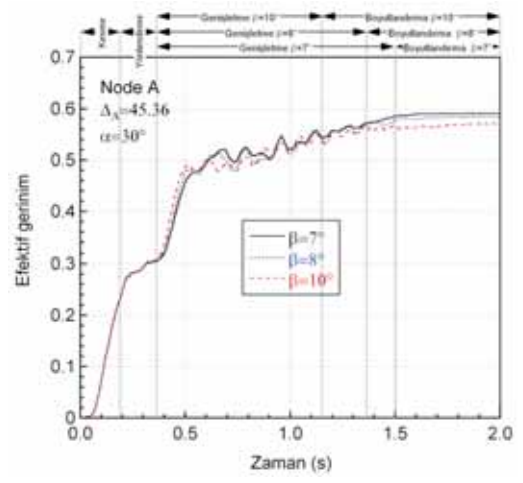
(a)



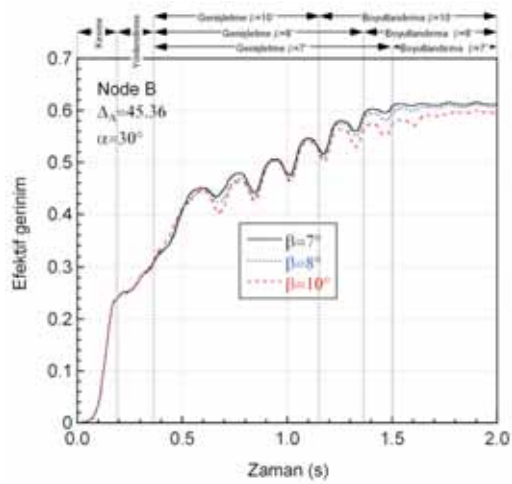
(b)



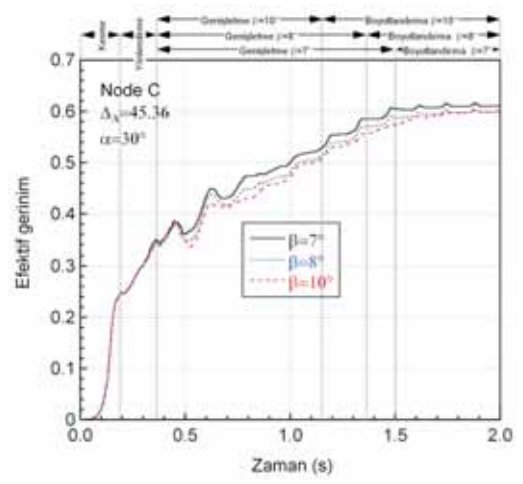
(c)



(d)

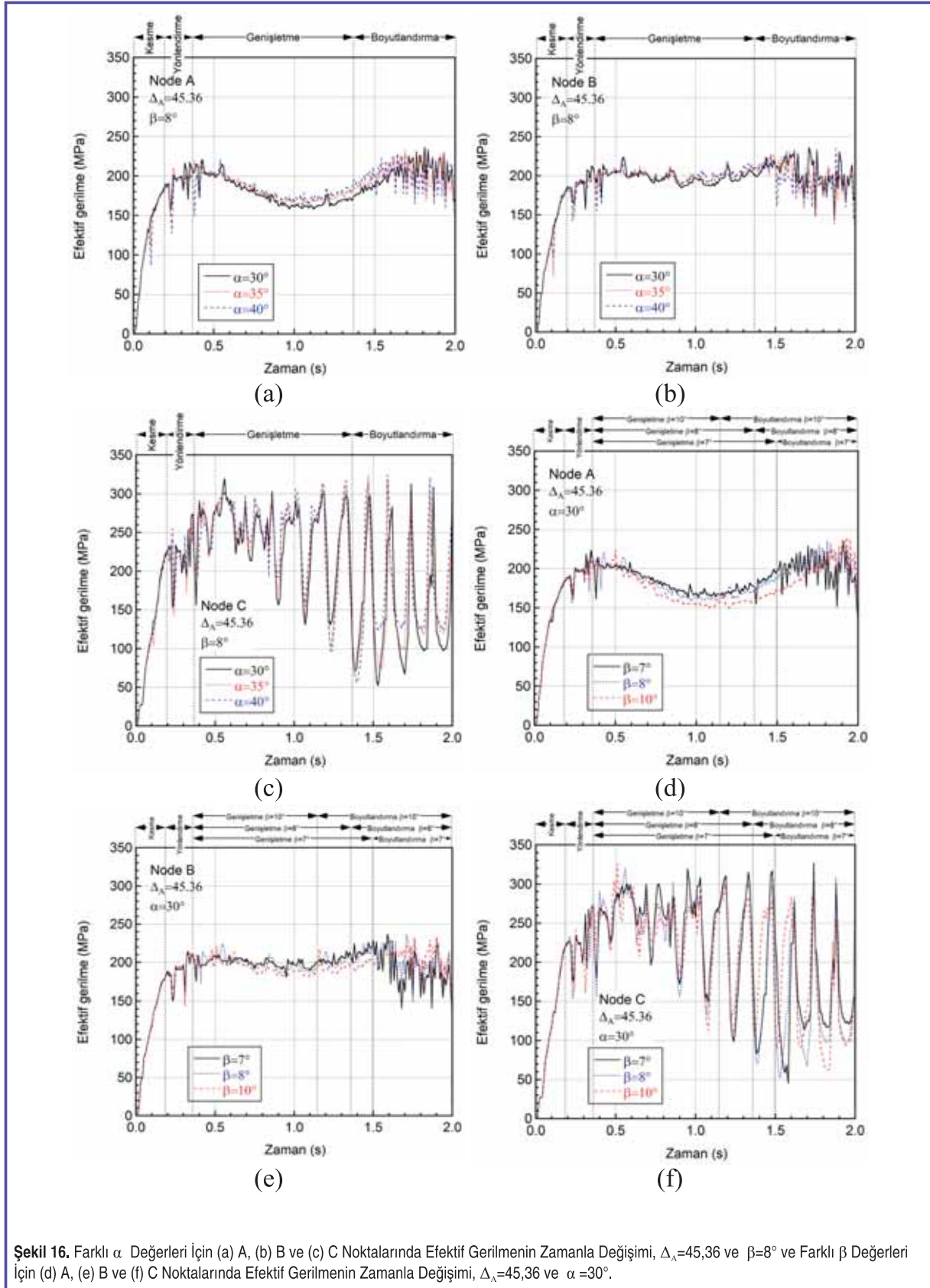


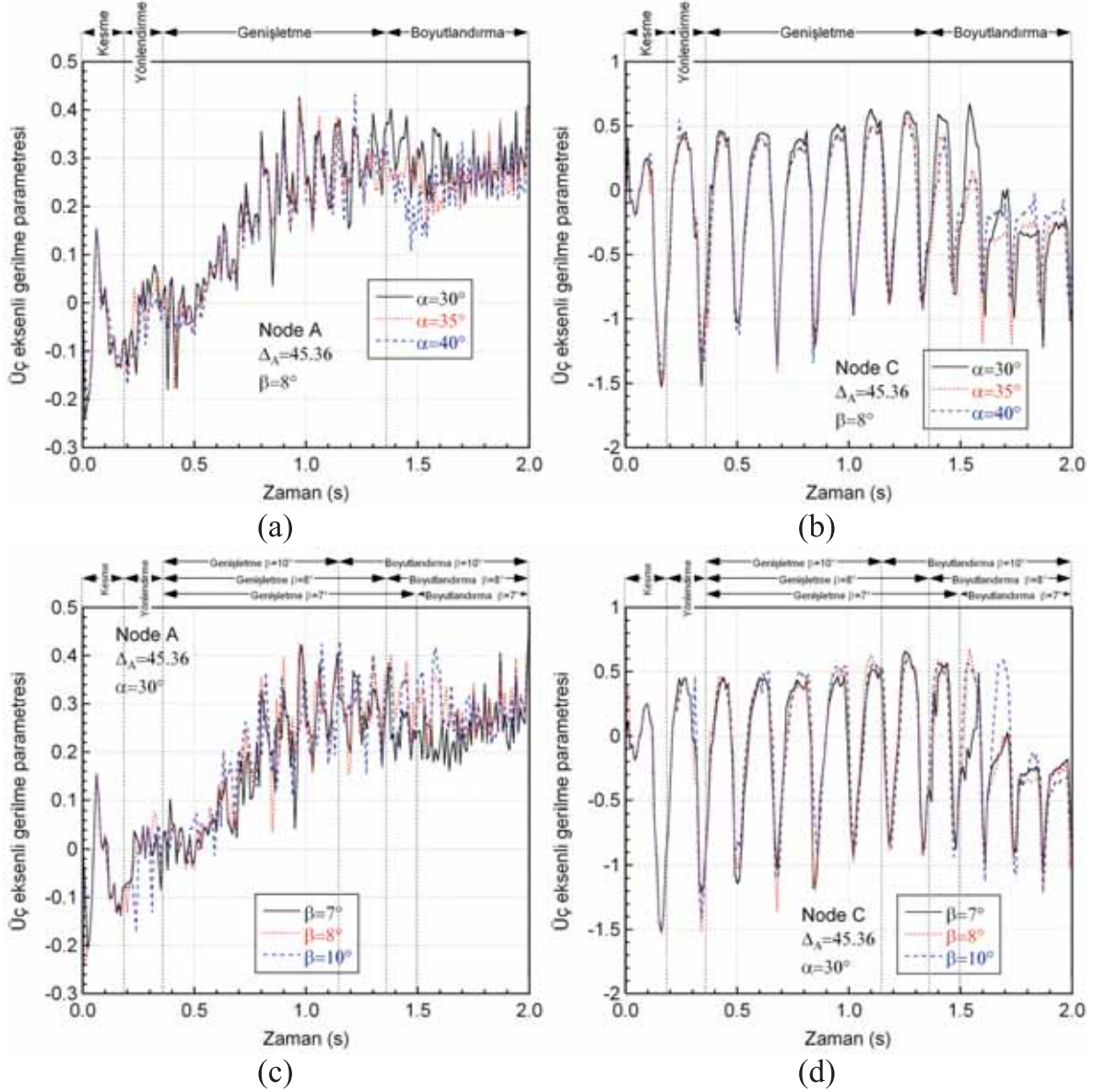
(e)



(f)

Şekil 15. Farklı α Değerleri İçin (a) A, (b) B ve (c) C Noktalarında Efektif Gerininin Zamanla Değişimi, $\Delta_A=45,36$ ve $\beta=8^\circ$ ve Farklı β Değerleri İçin (d) A, (e) B ve (f) C Noktalarında Efektif Gerininin Zamanla Değişimi, $\Delta_A=45,36$ ve $\alpha=30^\circ$





Şekil 17. Farklı α Değerleri İçin (a) A ve (b) C Noktalarında Üç Eksenli Gerilme Parametresinin Zamanla Değişimi, $\Delta_A=45,36$ ve $\beta=8^\circ$ ve Farklı β Değerleri İçin (c) A ve (d) C Noktalarında Üç Eksenli Gerilme Parametresinin Zamanla Değişimi, $\Delta_A=45,36$ ve $\alpha=30^\circ$

f)'de gösterilmektedir. Çalışılan α ve β değerlerinin incelenen noktadaki efektif gerilme üzerine çok az etkisi olduğu belirlenmiştir. Artan β ile gerilme değerleri nispeten azalmaktadır. Bunun sebebi genişletme bölgesi uzunluğunun artan β değerlerinde kısılmasıdır.

Efektif gerilmenin α ile değişimi Şekil 16(a-c)'de A, B, ve C noktaları için sırasıyla gösterilmektedir. Şekillendirme açısının etkisi genişletme bölgesinde merkez noktada en fazladır ve α 'nın artması ile efektif gerilme de artmaktadır (Şekil 16(a)). Şekil 16(d-f)'de A, B, ve C noktaları için β 'nin efektif gerilme dağılımına etkisi gösterilmektedir. Merkez noktadaki efektif

gerilme değerleri artan β değerleri ile azalmaktadır (Şekil 16(d)). Orta ve yüzey noktalarda ise β 'nin efektif gerilme üzerine etkisi nispeten daha azdır (Şekil 16(e) ve (f)).

Üç eksenli gerilme parametresinin α ile değişimi Şekil 17 (a) ve (b)'de A ve C noktaları için sırasıyla gösterilmektedir. Azalan α açısı ile merkez, orta ve yüzeydeki üç eksenli gerilme parametresi çok az azalmaktadır. Üç eksenli gerilme parametresi β ile değişimi ise Şekil 17 (c) ve (d)'de sırasıyla A ve C noktaları için gösterilmektedir. Boyutlandırma bölgesi hariç β 'nin artması ile üç eksenli gerilme parametresi her üç noktada nispeten oldukça az artmaktadır.